

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

**“MÉTODOS ÓPTIMOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS
ARCILLOSOS COLAPSABLES – 2021”**

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Civil

Autores:

Juan Carlos Bautista Laruta

Jhon Henry Rodriguez Pomajulca

Asesores:

Mg. Neicer Campos Vásquez

<https://orcid.org/0000-0003-1508-6575>

Mg. Ruben Kevin Manturano Chipana

<https://orcid.org/0000-0002-9685-2886>

Lima – Perú

2023

JURADO EVALUADOR

| | | |
|---------------------------|--------------------|----------|
| Jurado 1 Presidente(a) | Jose Neyra Torres | 41455569 |
| | Nombre y Apellidos | Nº DNI |

| | | |
|----------|----------------------|----------|
| Jurado 2 | Erick Rabanal Chavez | 40234321 |
| | Nombre y Apellidos | Nº DNI |

| | | |
|----------|------------------------|----------|
| Jurado 3 | Edmundo Vereau Miranda | 40501601 |
| | Nombre y Apellidos | Nº DNI |

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a mis padres Marcelino y Simona, por sus bendiciones, ser el motivo para alcanzar mis metas en la vida y haberme forjado con valores humanos, por su apoyo incondicional, sus bendiciones, consejos y amor. A mis hermanos Pablo, David, Angelica y Mauricio quienes me motivaron a seguir adelante con el cariño que siempre les caracterizó y aconsejándome a ser una mejor persona. A mis amigos de estudio Juan y Karen que siempre se preocuparon y me apoyaron motivándome a seguir estudiando y poder alcanzar mis metas trazadas en la vida que a pesar de la distancia se preocupan y están pendiente de mi persona. Finalmente, a mi amigo Jhon, con quien logramos concluir de manera satisfactoria este trabajo, a pesar de que se presentaron dificultades y que logramos resolverlos a lo largo de su elaboración. Su valioso apoyo, responsabilidad y solidaridad es una de las razones por las que le estaré muy eternamente agradecido.

Juan Carlos Bautista Laruta

El presente trabajo de investigación, lo dedico en primer lugar a Dios por bendecirme diariamente y disfrutar de mi familia que me apoyan y fortalecen para alcanzar los éxitos que me trace en la vida. A mi señora esposa Maria Soledad por haberme brindado el apoyo en poder alcanzar la meta que me trae y por darme unos hijos maravillosos, los que son el motor de mi vida, a mis hijos Leonardo y Kaela son mi mayor tesoro y fuente de inspiración y felicidad en mi vida. A mis padres y hermanos por su apoyo, consejos y por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles de mi vida. A mi estimado amigo Juan que es parte importante de esta gran aventura de conocimiento, que con su esfuerzo y dedicación logramos concluir este trabajo. A mis amigos que me alentaron y apoyaron con sus conocimientos y por los buenos momentos que hemos compartidos,

Jhon Henry Rodríguez Pomajulca

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por brindarnos salud, sabiduría y fortaleza y bendecirnos con vida durante este proceso. Gracias a nuestros padres y familias por ser el motor de nuestras vidas, confiar en nosotros, por ser el impulso para mejorar cada día, por inculcarnos valores, esfuerzo, honestidad durante nuestra vida. A nuestros compañeros de estudio, por la confianza y camaradería que nos han brindado todo este tiempo. Queremos agradecer a nuestro asesor en este trabajo de investigación, Neicer Campos Vásquez, por brindarnos sus valioso conocimiento, amistad y experiencias profesional, por su tiempo invertido en nosotros para que lleguemos con éxito al fin de este arduo camino. A nuestra alma mater la Universidad Privada del Norte sede Lima Breña y a nuestros docentes, en especial a todos los de nuestra carrera Ingeniería Civil por su dedicación y enseñanzas, que nos ayudaron a crecer como profesionales en cada clase impartida. Por último, gracias a nuestras familias y amistades, por estar siempre a nuestro lado de manera desinteresada. A todos y cada uno, nuestros sinceros agradecimientos.

**Juan Carlos Bautista Laruta y
Jhon Henry Rodríguez Pomajulca**

Optimum Collapsible Clay Soil Compaction Methods – 2021

Jhon Henry Rodriguez-Pomajulca, Juan Carlos Bautista-Laruta, Campos-Vasquez Neicer, Maestro en Ciencias Económicas, Manturano-Chipana Rubén Kevin, Maestro en Educación Superior, Universidad Privada del Norte, Perú, N00208470@upn.pe, N00218685@upn.pe, neicer.campos@upn.edu.pe, ruben.manturano@upn.edu.pe

Abstract – The effectiveness of soil compaction can be achieved with an appropriate choice of equipment to be used and based on the type of soil to be compacted, in order to maximize the necessary compaction energy and achieve an adequate soil compaction condition, it would be It is feasible to determine it through laboratory tests, however we must take into account that there are various compaction methods carried out in the field, such as: static pressure, by impact, by vibration, complicating the choice of the method that meets the technical conditions. consider the optimal moisture content in each type of soil to achieve maximum densification of the same, by providing adequate compaction energy. In this report we present techniques developed for the compaction of soils used today.

Keywords: Compaction, static pressure, impact, vibration, densification.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

Métodos óptimos de compactación de suelos arcillosos colapsables - 2021

Jhon Henry Rodriguez-Pomajulca, Juan Carlos Bautista-Laruta, Campos-Vasquez Neicer, Maestro en Ciencias Económicas, Manturano-Chipana Rubén Kevin, Maestro en Educación Superior, Universidad Privada del Norte, Perú, N00208470@upn.pe, N00218685@upn.pe, neicer.campos@upn.edu.pe, ruben.manturano@upn.edu.pe

Abstract – The effectiveness of soil compaction can be achieved with an appropriate choice of equipment to be used and based on the type of soil to be compacted, in order to maximize the necessary compaction energy and achieve an adequate soil compaction condition, it would be feasible to determine it through laboratory tests, however we must take into account that there are various compaction methods carried out in the field, such as: static pressure, by impact, by vibration, complicating the choice of the method that meets the technical conditions. consider the optimal moisture content in each type of soil to achieve maximum densification of the same, by providing adequate compaction energy. In this report we present techniques developed for the compaction of soils used today.

Keywords: *Compaction, static pressure, impact, vibration, densification.*

Resumen- *La eficacia de una compactación de suelos se puede lograr con una elección adecuada de los equipos a utilizar y en base al tipo de suelo a compactar, a fin de maximizar la energía de compactación necesaria y lograr una adecuada condición de compactación en el suelo, sería factible determinarlo mediante ensayos de laboratorio, sin embargo debemos tomar en cuenta que hay diversos métodos de compactación realizados en campo como por ejemplo: presión estática, por impacto, por vibración, complicando la elección del método que cumpla con las condiciones técnicas, asimismo se debe considerar el óptimo contenido de humedad en cada tipo de suelo para lograr una máxima densificación del mismo, al proporcionar una adecuada energía de compactación. En este informe presentamos técnicas desarrolladas para la compactación de suelos empleados en la actualidad.*

Palabras clave: *Compactación, presión estática, impacto, vibración, densificación.*

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación está enfocada en el Análisis de efectividad de los métodos de compactación de suelos que se puede definir como prensado de las partículas de suelo cercanas entre sí por métodos mecánicos [7]. El aire durante la compactación de la tierra es echado del espacio vacío en la masa del suelo y por lo tanto la densidad de masa se aumenta, también el incremento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al subyugar el suelo a técnicas convenientes, que incrementa el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos [8]

La característica principal de los métodos de compactación de suelos es que ayuda a fortalecer suelos que no cumplen los requerimientos necesarios y así poder utilizarlos sin ningún problema, dado que hay varios métodos y cada uno se utiliza en

un suelo diferente [5]. Los métodos de compactación ayudan a que en un trabajo no haya desplazamientos de terreno o la obra después de su culminación sufra daños (rajaduras) o en todo caso se derrumbe [15]. Constituyen la parte estructural de las carreteras, los ferrocarriles o las autopistas, y se utilizan para el transporte peatonal y vehicular. El grado de compactación es determinado por el juicio entre la densidad seca del suelo y la densidad seca máxima adquirida a través de un ensayo Proctor Modificado en un laboratorio [4].

Por otro lado, en la construcción de obras viales (p. ej. carreteras, calles, aeropistas), la compactación es un proceso utilizado muy frecuentemente, con la finalidad de densificar el material y mejorar ciertas propiedades como incrementar la resistencia a la penetración, disminuir la permeabilidad y deformaciones, este hecho era conocido empíricamente desde la época de los romanos. [5]

Los equipos utilizados para realizar los métodos alternativos en este estudio son conocidos como: cono dinámico, penetrómetro con anillo de carga y compactómetro electrónico. Con estos equipos se han establecido correlaciones por parte de los fabricantes, que son necesarias validar en nuestro medio. [2]

También el desarrollo tecnológico sobre todo el de las ciencias informáticas da paso al surgimiento de las tecnologías en la compactación, las cuales están orientadas al manejo de los factores que afectan el rendimiento de la compactación desde una perspectiva particular, poniendo énfasis en cada sector específico del terreno. Esta tecnología está indisolublemente ligada al desarrollo de sensores para la determinación remota o en tiempo real. [18]

Especificar y llegar a determinar ¿cuáles son los métodos óptimos más utilizados en nuestro medio y a nivel mundial en la compactación de suelos arcillosos colapsables?, determinar cuáles son los métodos que generan mejores niveles de compactación en los suelos, haciendo que nuestra labor sea más eficiente y segura, sirviendo este artículo de guía para que los ingenieros puedan tener un resultado esperado y/o mejorado y poder redireccionar y utilizar, siempre en función al tipo de suelos sobre el que se deba edificar y así permita elegir un método idóneo para dicho trabajo.

El objetivo es identificar los métodos óptimos que generen compactaciones más eficientes en los suelos arcillosos colapsables, buscamos determinar lo efectivos que pueden ser los métodos de compactación de suelos y cuan bien utilizados son en nuestro país y en el extranjero. Determinar el método de

compactación más adecuado para cada tipo de suelo que existe en nuestro planeta, los resultados serían mucho más beneficiosos para los suelos arcillosos tomando el estándar de compactación exigido en este trabajo, que generalmente oscila entre un 85% y un 100% de la Máxima Densidad Seca (MDS) del mismo, obtenida en laboratorio, por ende la necesidad de hacer una elección adecuada del equipo, para optimizar la energía de compactación y lograr una excelente condición de compactación en suelo.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación está basada en una Revisión Sistemática, se denomina así a la investigación descriptiva y que señala la manera de cómo se manifiesta el fenómeno o evento, en el cual se busca especificar las importantes características para hacer la medición de todos los aspectos, dimensiones y los componentes del fenómeno.

Las revisiones sistemáticas son resúmenes claros de una indagación que utiliza métodos explícitos y reproducibles por otros investigadores de un argumento concreto. Se aplica estrategias científicas que examinen una dirección sistemática, y una valoración, consideración de un breviarío de un argumento específico.

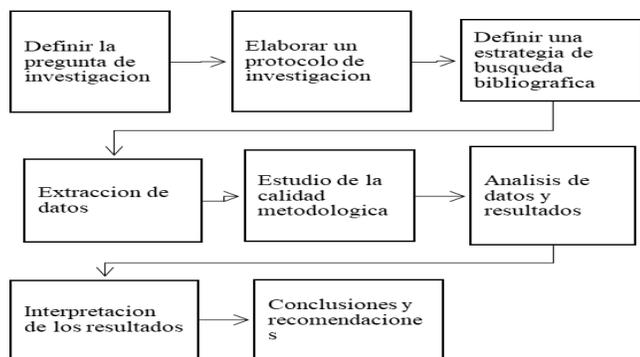


Figura 1: Proceso de Análisis Bibliográfico. Elaboración Propia.

Para el análisis de investigaciones se tomaron base de datos académicas como Scielo, Redalyc, Scopus y repositorios de universidades, de las cuales se realizó una búsqueda teniendo en cuenta las palabras clave como: Métodos de compactación, suelos arcillosos, suelos colapsables. Estabilidad de suelos.

a) Criterios de Inclusión.

- Será considerado todo estudio que tenga que ver con los “métodos y equipos de compactación de suelos arcillosos colapsables”
- Consideramos los estudios que hablen sobre los métodos de compactación de suelos.
- Serán considerados las publicaciones realizadas en universidades, revistas científicas, artículos de revistas de congresos internacionales, tesis y libros.
- En esta investigación se considera investigaciones que fueron publicadas entre 1987 y 2021.
- Se consideran las publicaciones en idioma español e inglés.

b) Criterios de Exclusión

- Durante nuestra revisión sistemática se ha excluido publicaciones mayores de 35 años de publicación.
- también se ha excluido publicaciones que no estén relacionadas con nuestro tema planteado.
- Excluimos las publicaciones que no estén dentro de las páginas donde nos brinda información confiable.

Como estrategia de búsqueda se toma palabras claves como: compactación, laboratorio de consolidación, presión estática, impacto, vibración, densificación, las cuales nos fue positiva la selección de artículos. Con los resultados obtenidos en cada búsqueda se encontró entre 5 y 10 artículos se procedió a aplicar los criterios de inclusión y exclusión lo que permite reducir el número de artículos hasta lograr seleccionar los más importante de cada búsqueda. Obteniendo un total de 21 artículos significativos.

III. RESULTADOS

Del estudio de las Correlaciones entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de suelos [2]. Se pretendió corroborar que tan certeras son las correlaciones dadas por el fabricante para los tipos de suelos analizados. Con los resultados obtenidos, lo que se buscó fue obtener comportamientos generales de los suelos. No se buscó mostrar comportamientos específicos de cada tipo de suelo; ya que esto limita a un uso de los datos obtenidos, para un determinado tipo de material. Para los casos donde no se pudo establecer una correlación satisfactoria en forma general, se mostraron comportamientos específicos. Cono dinámico. De los datos obtenidos fue posible elaborar una gráfica, en donde consideramos que se muestra claramente la relación entre el cono y el SPT para los suelos analizados [2]. En el suelo tipo OH y MH (Tobosi), se presentaron comportamientos similares con respecto al número de golpes obtenidos; tanto en la prueba SPT (valores que van de 22 a 38), como en el ensayo con el cono dinámico (valores que van de 9 a 17). Con el suelo MH (Tablón), se obtuvieron resultados más bajos; para el SPT (de 4 a 7 golpes), con el cono dinámico (de 2 a 5 golpes). De acuerdo con las conclusiones del fabricante, el cono dinámico produce correlaciones buenas en un rango de 4 a 30 golpes. Por lo tanto, se puede ver que la mayoría de los datos se encuentran dentro de ese rango, lo que dio mayor confiabilidad a los resultados obtenidos.

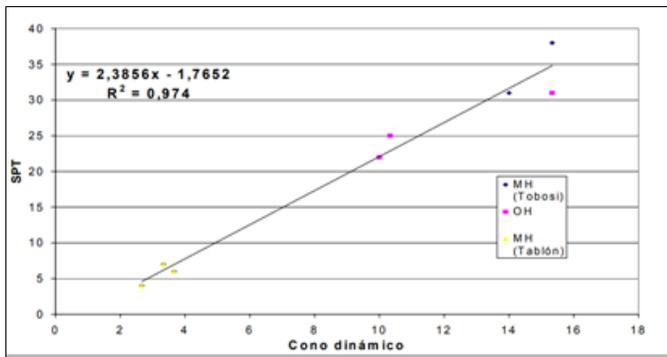


Figura 2. Valores SPT Vs Cono Dinámico para los suelos analizados [2].

Pruebas realizadas al 95% del Proctor modificado y sumergidas. Para estos especímenes si fue posible lograr la introducción de la altura del cono en su totalidad. La razón por la que se sumergen las muestras es para tener una condición similar a los resultados del CBR saturado y poder buscar así la relación. Se analizaron las lecturas obtenidas de las muestras y se compararon con el CBR, en condición saturada. Cabe mencionar, que, para el análisis, no se tomó en cuenta el valor del molde número 2, debido a que se alejaba mucho de los otros valores para este tipo de suelo. De esta manera, se obtuvo la gráfica AR4 que presenta un coeficiente R^2 de 0,9213. Esto indica que existe una buena correlación entre los resultados obtenidos. Para esta condición, también se estudió la relación entre la densidad seca máxima y la resistencia a la penetración según el anillo; para este caso, se obtuvo un coeficiente de correlación R^2 de 0,8048 de la gráfica AR5. Este valor podría considerarse como aceptable, si lo que se requiere es una verificación rápida de la densidad del sitio. La presente investigación me pareció sumamente importante ya que nos habla de la correlación entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de suelos. Los datos obtenidos nos muestra la relación entre el cono y el SPT. Se hicieron pruebas realizadas al 95% del Proctor modificado y sumergido [2].

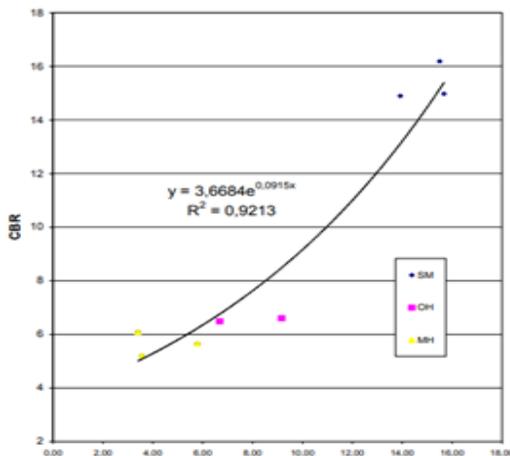


Figura 3. Correlación entre CBR Saturado y el PAC para muestras al 95 %

del Proctor modificado y sumergido [2].

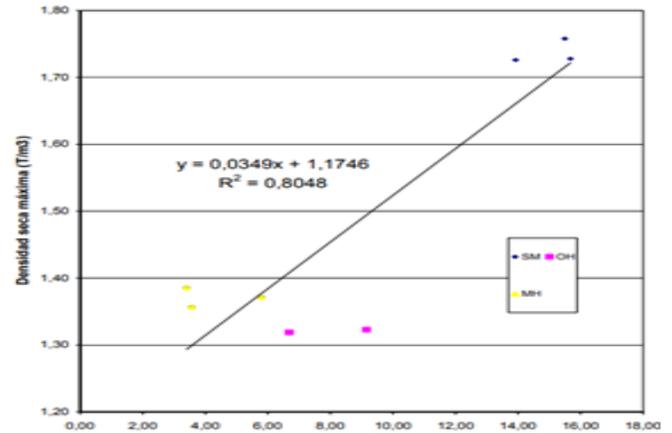


Figura 4. Correlación entre densidad seca máxima y el PAC para muestras al 95% del Proctor modificado y sumergido [2].

Del estudio de la Comparación entre los distintos métodos de compactación de suelos mezclados con cemento y su eficiencia ambiental [19]. Todos los ensayos realizados en el equipo de compactación giratoria registran en un archivo de texto para cada número de giro la altura de la muestra, la presión vertical y el ángulo de giro. La altura de la muestra permite determinar el volumen de ésta y con el peso y el contenido de humedad que se toman al finalizar el ensayo, es posible llegar a conocer el peso unitario seco en función del número de giros. Comparando el grupo de ensayos en cada figura, puede observarse que la presión vertical es el principal factor que contribuye a obtener un mayor grado de compactación. Para presiones verticales inferiores a 200 kPa, existe una relación creciente entre el contenido de humedad y el peso unitario seco. Solo a partir de 200 kPa, se registra un máximo en la curva, es decir se puede identificar un punto óptimo en el contenido de humedad. Al tratar de utilizar mayores contenidos de humedad, se observó que la presión aplicada junto con el amasado produce drenaje parcial del agua, posiblemente debido a la permeabilidad del material y al ángulo de giro utilizado. El drenaje de las muestras en compactaciones a humedades altas fue un fenómeno que también se presentó en la investigación realizada por el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Florida. Esta información nos habla de todos los ensayos que han sido realizados y comparados los ensayos hechos con el equipo de compactación nos dice que la presión vertical es el principal factor que contribuye para obtener un mayor grado de compactación [19].

Tabla 1 – Tabla de Resultados de la estimación de densidad aparente seca del suelo

| Nivel Exp | Dmá x, kN | MC Kg/kg ₁ | d; m | Clay. % | BD, g*cm ³ | Ec 5 | Er, % | Ec 6 | Er, % | Ec 7 | Er, % | Ec 8 | Er, % | V, Km/h |
|-----------|-----------|-----------------------|------|---------|-----------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|---------|
| Bajo | 0,76 | 0,21 | 0,2 | 45,0 | 0,89 | 0,79 | 10,5 | 0,90 | 0,51 | 0,85 | 4,16 | 0,86 | 3,13 | 5,00 |
| Alto | 0,42 | 0,35 | 0,2 | 45,0 | 1,0 | 1,02 | 1,80 | 1,16 | 16,1 | 1,02 | 1,50 | 1,00 | 0,23 | 1,67 |

Fuente [19]

Tabla 2 – Tabla de ANOVA

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|----------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Between groups | 0,03457 | 4 | 0,0086425 | 0,63 | 0,6492 |
| Within groups | 0,20605 | 15 | 0,0137367 | | |
| Total (corr) | 0,24062 | 19 | | | |

Fuente [19]

Del estudio de la Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación [5]. Los resultados de la caracterización mecánica se presentan en la tabla 1, donde se observa las características del suelo analizado, que corresponde a un material fino plástico A-7-6(15), con un índice de plasticidad de 23.6%. Detallado en la siguiente tabla 1.

Tabla 3.- Características del suelo estudiado

| | |
|------------------------------|-----------|
| Contenido natural de agua(%) | 7.2 |
| Limite Liquido (%) | 48.2 |
| Índice de plasticidad (%) | 23.6 |
| Densidad Relativa de solidos | 2.7 |
| Arena gruesa (%) | 1.5 |
| Arena fina (%) | 1.5 |
| Limo y Arcilla(%) | 97 |
| Clasificación del suelo | A-7-6(15) |

Fuente [5]

Los resultados de la prueba de compactación con energía modificada se presentan en la figura 5, donde se observa que el contenido de agua óptima es de 17.1% y el peso volumétrico seco máximo es de 17.39 kN/m³

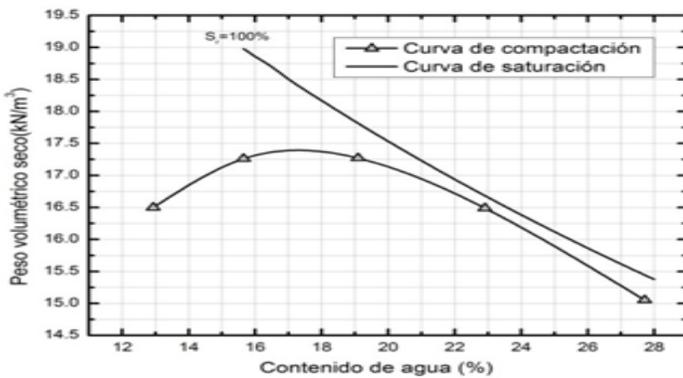


Figura 5.- Curva de Compactación de Material [5].

Se trazaron las familias de curvas de saturación para diferentes grados de saturación, como se muestra en la figura 6, donde se observa que el óptimo de la curva de compactación presenta un grado de saturación de 85%

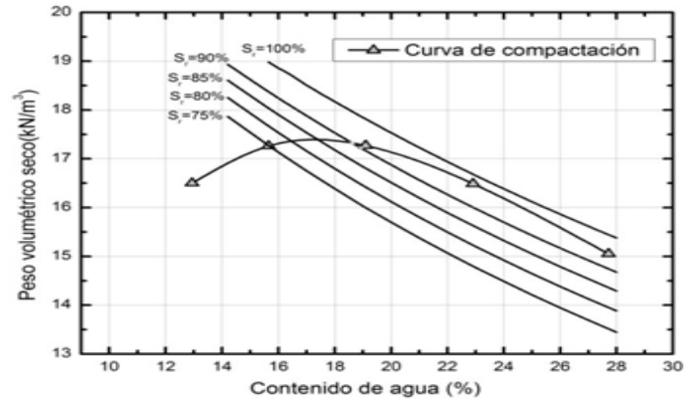


Figura 6.- Familia de curvas con diferente grado saturación [5].

En la figura 7 se muestra la curva esfuerzo-penetración del suelo A-7-6(15) para una energía de compactación de 2700 kNm/m³, (56 golpes por capa), con 17.1% de contenido de agua y un peso volumétrico seco de 17.4 kN/m³, es decir en las condiciones del óptimo de la curva de compactación de la figura 3, donde en estas condiciones el suelo presenta un CBR de 62% (43.4 kg/cm²).

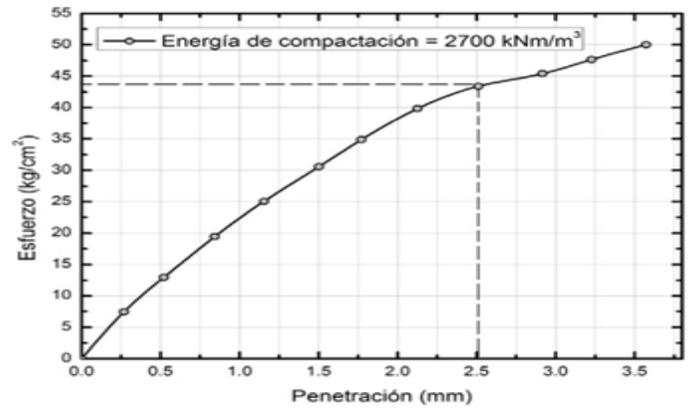


Figura 7.- Curva de ensayo CBR [5].

En la figura 6 se presenta: la curva de compactación, saturación y estabilidad, en esta gráfica se observa cualitativamente que a menor contenido de agua se obtiene un menor peso volumétrico seco, sin embargo, se obtiene la mayor resistencia (CBR) para una penetración preestablecida de 0.1” (2.54 mm), en contra parte, se observa que la relación de vacíos no es la mínima. Esto sugiere que al compactar el material con un contenido de agua de 13% se obtendría la mayor resistencia del suelo (punto A de la curva de estabilidad, 80% CBR), sin embargo, se observa que en esas condiciones el suelo presenta un volumen de vacíos de 38.8%. En el óptimo de la curva de compactación se observa que la resistencia a la penetración (punto D de la curva de estabilidad, 62% CBR) no es la máxima, no obstante, en estas condiciones el volumen de vacíos es mínimo (35.5%). Así pues, si se realiza una compactación en las proximidades del contenido de agua óptimo se observa que el volumen de

vacíos se reduce y se alcanza un valor muy próximo al peso volumétrico seco máximo, además en caso de que el suelo se encuentre expuesto a cambios de contenidos de agua, la resistencia a la penetración no se ve tan fuertemente afectada, esto es, con el contenido de agua óptima el valor de la resistencia a la penetración (punto D de la curva de estabilidad), se puede mover entre los puntos C y E, sin que se vea afectada considerablemente la resistencia a la penetración. Se observa que cuando el suelo es compactado con un contenido de agua de 13% su peso volumétrico seco es de 16.5 kN/m³, su volumen de vacíos es de 38.8% y su resistencia a la penetración o CBR es de 80%, si este suelo se humecta hasta alcanzar 23%, su resistencia a la penetración o CBR es de 14.63% lo que indica que, debido al aumento de la humedad en la masa del suelo, su resistencia a la penetración se reduce en 81.7%.

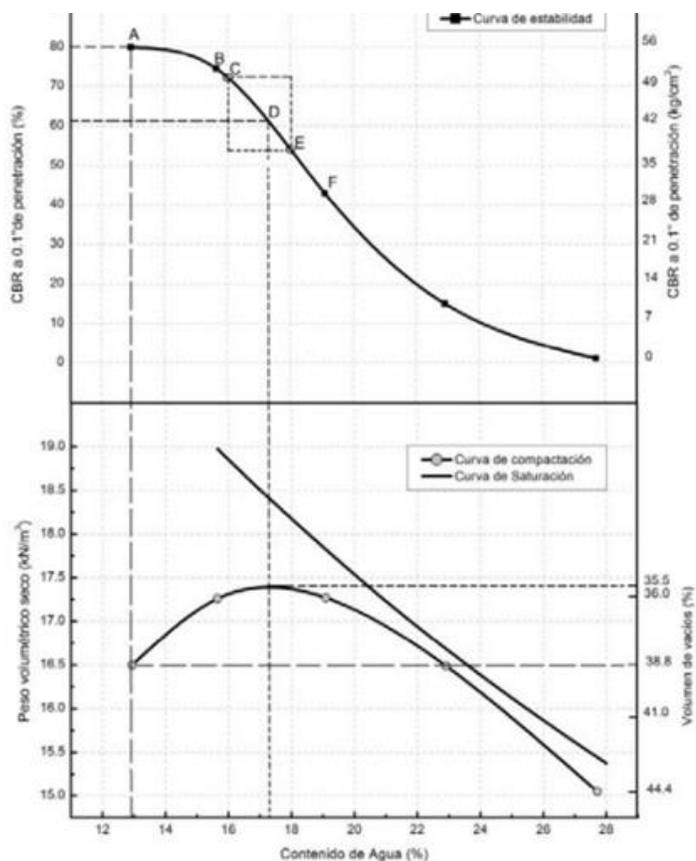


Figura 8.- Curva de compactación, saturación y estabilidad [5].

En el estudio de Generalidades sobre compactación de suelos [1]. Comparando los resultados entre Proctor Estándar y Proctor Modificado, para un mismo suelo, se puede comprobar que el Modificado provee valores de Densidad Seca Máxima más elevados, a consecuencia de la mayor energía aportada, en correspondencia con menores valores de Humedad Óptima. Actualmente, ambas pruebas cuentan con

variantes a las formas originales. La elección del tipo de ensayo a efectuar dependerá, básicamente, de la naturaleza de la obra a realizar y del método de compactación a utilizar. 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). También nos dice que la densidad seca máxima es más elevada a consecuencia de la mayor energía aportada, con menor humedad óptima, ambas pruebas cuentan con variantes a las formas originales.[1].

En el estudio de Soluciones dinámicas para la compactación de suelos in situ en estructuras de pavimentos [9]. En el proceso constructivo de una estructura de pavimento, el procedimiento de compactación de los materiales granulares es el más importante. Lo anterior se debe a que las capas granulares son las encargadas de recibir la parte de la carga, puesto que una buena compactación del material granular aumenta la capacidad de soporte del suelo, reduce los asentamientos del terreno, reduce la permeabilidad del suelo, lo que permite que las capas superiores no se vean contaminadas por el material orgánico de la capa subrasante de la estructura, el escurrimiento y la penetración del suelo, de tal forma que el agua pueda fluir sin ningún problema y que la regulación del drenaje se realice con mayor facilidad. De igual manera ocurren problemas en la estructura en general del pavimento, esto a causa de la compactación del material granular la cual influye directamente con el comportamiento dinámico de la estructura. Por consiguiente, si se realiza una mala compactación el módulo de las capas granulares se verá afectado y la rigidez de la estructura disminuirá, a consecuencia, la vida útil del pavimento se verá afectada. Con base en lo anterior se decidió estudiar el comportamiento de las capas granulares durante el proceso de compactación. El caso a estudiar es el método de compactación realizado en construcción por medio de fuerzas vibratorias, causados por una máquina de compactación [8]. La idea del proyecto de investigación es diseñar un modelo a escala reducida que permita comparar el modelo matemático que presenta una solución al problema de la compactación de los materiales granulares y un experimento que refleje dicha solución, de tal forma que, en el momento de aplicar dicho modelo, ya sea en un ensayo de laboratorio o en un proyecto vial, se sepa con ciencia cierta si el suelo se encuentra bien compactado o no.[9]

En la investigación de Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte [20]. Se observa que, en estas obras, la compactación está sujeta a una cierta norma dentro de todo un conjunto y, por ende, no puede variarse en forma aislada sin riesgo de desbalancear el conjunto. En muchos países existe la idea de que cuanto más se compacte un suelo para una carretera o para un ferrocarril se obtendrán mejores resultados y se pide que se haga más y más exigente la norma de compactación, alcanzando cada vez mayores pesos volumétricos. Si este criterio se impone sin una atención correspondiente a las normas de plasticidad o sin una mucho mayor protección de los terraplenes contra el agua, por ejemplo, utilizando con mayor profusión las técnicas del subdrenaje, se corre el peligro de tener terraplenes de suelo fino, intensamente compactados y expuestos a la acción del agua; es decir, obras con gran inestabilidad volumétrica, cuya resistencia disminuirá y cuyo mal comportamiento podrá garantizarse [20]

En el estudio Método y Equipos De Compactación De Suelos. [3]. Una investigación de relevancia fue realizada en Chile para realizar el control de compactación en tranques de relave, determinando el grado de compactación y el espesor final de capa compactada y considerando la variabilidad que presenta in situ este tipo de materiales, una alternativa posible de emplear es el penetrómetro dinámico ligero PANDA (Pénétrömètre Autonome Numérique Dynamique Assisté). Comparado con las herramientas habitualmente empleadas para el control de compactación (método cono de arena y densímetro nuclear), el penetrómetro PANDA presenta una serie de ventajas, tales como: rapidez en la ejecución del ensayo, fácil repetitividad, versatilidad del equipo, fiabilidad de los resultados obtenidos, sustentabilidad ambiental, bajos costos y facilidad de transporte lo que permite analizar lugares de difícil acceso como los taludes de tranques de relaves[4].

Si bien actualmente los avances de la práctica ingenieril y el marco normativo chileno han permitido el desarrollo de proyectos de tranques de relaves de alturas del orden de 250 (m), existe aún una serie de vacíos legales específicamente en relación al control de compactación que debe ser realizado durante la etapa operacional de estos depósitos. En efecto, actualmente solo se controla el grado de compactación a nivel superficial, considerando un número reducido de puntos definidos a "juicio ingenieril", sin considerar dos aspectos fundamentales: el espesor de capa depositada y la variabilidad que presentan las arenas de relaves. Ello podría conducir a generar zonas de débil resistencia al interior del muro resistente de un tranque de relaves y por consecuencia un inadecuado comportamiento mecánico conducente a fallas o colapsos estructurales [3]

Respecto al artículo Efecto del uso de materiales reciclados y

métodos de compactación en las propiedades mecánicas e índice de reflectancia solar del hormigón permeable [15]. Tenemos, 2 aspectos fundamentales, primero el análisis de la energía de compactación y luego la permeabilidad, analizadas en base a 3 muestras específicas diversas.

Energía de compactación.- Para todos los cilindros, se registró el número de golpes necesarios del martillo Proctor para alcanzar una porosidad del 20% y luego, este número se usó para calcular la energía de compactación para cada mezcla. Los resultados revelaron que la energía de compactación necesaria para alcanzar el 20% de porosidad se ve afectada por el tipo de agregado y contenido de pasta de cemento de la mezcla. Por ejemplo, en mezclas con un contenido medio de pasta de cemento, la cantidad de energía de compactación aplicada a la gravilla fue un 52% menor que la necesaria para una mezcla preparada con agregados calcáreos para obtener la misma porosidad. Esta diferencia se puede explicar por la forma redondeada de la gravilla, que facilita el flujo de sus partículas, mientras que el agregado triturado, como la piedra caliza, requiere más energía para fluir.

Las mezclas que usan RCAB resultaron más trabajables y requirieron sólo el 61% de la energía de compactación para alcanzar el 20% de porosidad en comparación con las mezclas preparadas con piedra caliza. Además, la comparación entre las partículas de agregados de RCAB y piedra caliza demostraron que esta última era más angular, lo que podría haber aumentado la trabazón de los agregados, disminuyendo su compactabilidad. En contraste, el uso de escoria no tuvo un efecto estadísticamente significativo en la energía de compactación necesaria para alcanzar el 20% de porosidad. Se analizó el efecto de la pasta de cemento sobre la energía de compactación requerida para una porosidad fija.

Se observó que la porosidad del 20% podía alcanzarse con un 72% menos de energía de compactación en las mezclas con piedra caliza, con un mayor contenido de pasta de cemento (razón agregada/pasta de 4.5) comparadas con mezclas preparadas con contenido medio de pasta de cemento (razón agregada/pasta de 5.2). En cambio, las mezclas preparadas con gravilla, con un menor contenido de pasta de cemento (razón agregada/pasta de 6,0) requirieron un 44% más de energía de compactación comparadas con las mezclas preparadas con contenido medio de pasta de cemento. [15] A continuación, se pueden apreciar en la tabla 5 las características del material utilizados.

Tabla 5.- Propiedades físicas de los agregados elegidos[15].

| Propiedad | Unidad | Gravilla | Piedra caliza | RCAB |
|---|--------|----------|---------------|-------|
| Unidad de Peso | kg/m3 | 1,588 | 1,471 | 1,411 |
| Absorción de Agua | % | 0.95 | 2.47 | 4.12 |
| Gravedad Especifica a Granel _{sd} ^b | .. | 2.61 | 2.57 | 2.42 |

| | | | | |
|--|----|-------|-------|-------|
| Gravedad Especifica a Granel ^{od} | .. | 2.59 | 2.5 | 2.32 |
| Vacios | % | 38.48 | 41.15 | 41.57 |

^assd, Condicion superficie seca saturada

^bod, condicion secada al horno

Permeabilidad

Probetas con porosidad fija: Se midió la permeabilidad para todas las mezclas compactadas a una porosidad fija del 20%. las mezclas con gravilla y piedra caliza con un contenido medio de pasta de cemento tuvieron una permeabilidad similar de $k=0.67 \pm 0.13$ cm/s y $k=0.60 \pm 0.18$ cm/s, respectivamente. Esta diferencia de 0,07 cm/s se encuentra dentro de la variabilidad del ensayo y, por lo tanto, no es estadísticamente significativa. En cambio, la permeabilidad para las mezclas con RCAB (0.89 ± 0.14 cm/s) resultó mayor que para los agregados vírgenes, lo que podría asociarse a una mayor interconectividad de los huecos en las mezclas con RCAB debido a la menor energía de compactación requerida (comparada con las mezclas preparadas con agregado calcáreo) para alcanzar la porosidad fija. Las variaciones en escoria no tuvieron un efecto significativo en la permeabilidad medida. La permeabilidad no se vio significativamente alterada cuando se usó un menor contenido de pasta de cemento en las mezclas de gravilla, aunque el uso de un mayor contenido de pasta en las mezclas de piedra caliza redujo levemente la permeabilidad del material. Los números de golpes del martillo Proctor nos ayudó para alcanzar la porosidad del 20%. El efecto de la pasta de cemento sobre la energía de compactación es necesario para alcanzar el 20% de porosidad También se analizó el efecto de la pasta de cemento sobre la energía de computación requerida para una porosidad Fija.

III. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSION

Aquí vamos a comparar los articulo más importantes En el artículo [11] se presenta las diferentes técnicas desarrolladas para la compactación de suelos utilizados en la actualidad en Colombia, como se adoptaron y adaptaron y en el artículo [4] es para analizar experimentalmente una metodología alternativa para el proceso de compactación de suelos en laboratorio.

En el artículo [13] se presenta como entregar una recopilación general de aspectos básicos que deben tenerse presente en el momento de diseñar, construir o inspeccionar una obra que incluya compactación de rellenos de tierra, permitiendo tomar decisiones acertadas, y en el artículo [9] la mejora del Proceso de Compactación en el Proceso Constructivo de Pavimentos Urbanos Mediante el control del contenido de humedad en las bases granulares.

En el artículo [15] se diagnostica las condiciones intermedias de compactación en el suelo es importante para evitar condiciones extremas, las cuales a menudo son visibles en el campo y en el artículo [12] trata de detallar cuales son las características de comportamiento que pueden ser mejoradas al compactar un suelo.

En este artículo [17] se ve la repercusión económica y ambiental de la compactación de los suelos agrícolas ha propiciado el desarrollo de nuevos medios y métodos para combatirla, por lo que el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un sensor para la medición continua de la compactación del suelo y en el artículo [20] mejorar las características de comportamiento de los materiales que constituyen las estructuras terreas (deformabilidad, resistencia, relación esfuerzo-deformación, permeabilidad y resistencia a la erosión)

En el artículo [19] vamos a determinar el “número de ciclos patrón a nivel de capa de afirmado para obtener el óptimo grado de compactación, utilizando métodos: cono de arena y densímetro nuclear; en el acceso principal a conga” y en el artículo [18] nos presenta modelos constitutivos empleados para la simulación de la compactación del suelo por medio del método de elementos finitos.

Aquí vemos en estos diez artículos que hemos comparado que en la primera comparación vemos las diferentes técnicas y una metodología alternativa para la compactación de suelos en la segunda comparación apreciamos aspectos básicos que deben estar presentes de construir y mejora del proceso de compactación, en la tercera comparación vemos la importancia de la compactación para evitar condiciones extremas y también detallar cuales son las características de la compactación, en la cuarta comparación se ve la repercusión económica y ambiental de la compactación y las características de los materiales que constituyen las estructuras terreas, en la última comparación vemos el “número de ciclos patrón a nivel de capa de afirmado para obtener el óptimo grado de compactación” y también presenta modelos constitutivos empleados para la simulación de la compactación del suelo

CONCLUSIONES

Según los resultados se obtuvo la gran importancia de la compactación de suelos dado que se usa para lograr el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. El propósito de los métodos de compactación de suelos son Aumentar la capacidad para soportar cargas, Impide el hundimiento del suelo, Reduce el escurrimiento del agua, Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo, Impide los daños de las heladas.

Respecto a los análisis, ensayos, pruebas, aprobaciones y resultados que se determinó cuan eficaces y favorables son los métodos de compactación de suelos, dado que si no fueran aplicados se generarían bastantes problemas de deslizamiento de terreno, rajaduras, derrumbes. Del Análisis se concluye

que hay 4 métodos que son muy importantes y eficaces:

1. Compactación de Masas Naturales y Terraplenes Existentes: Los estratos naturales y los terraplenes existentes no pueden compactarse en capes, hecho que excluye la aplicación de la mayoría de los métodos descriptos previamente, ya que, para ser efectivo, el agente compactador debe actuar en el interior de la mesa de suelo. El método de compactación más adecuado para una obra dada debe seleccionarse en función de la naturaleza del suelo. La forma más efectiva para compactar arena no cohesiva es por vibración. El método más simple para producir vibraciones a mucha profundidad consiste en hincar pilotes. Cuando se hincan pilotes en arena suelta, la superficie del terreno situado entre pilotes comúnmente se asienta, a pesar de la disminución de volumen producida por el desplazamiento de la arena por los pilotes.

2. Compactación de Suelos Arenosos o limosos, con Cohesión Moderada: A medida que aumenta la cohesión, disminuye rápidamente la eficacia de las vibraciones como medio de compactación, pues por pequeña que sea la adherencia entre partículas, esta interfiere con su tendencia a desplazarse a posiciones más estables. Además, la baja permeabilidad de estos suelos hace inefectiva la inundación con agua. En cambio, la compactación por capes utilizando rodillos ha dado muy buenos resultados. Hay dos tipos de rodillos en uso general: neumáticos y patas de cabra. Los RODILLOS NEUMATICOS, se adaptan mejor para compactar los suelos arenosos ligeramente cohesivos, los suelos compuestos cuyas partículas se extienden desde el tamaño de las graves a la del limo y los suelos limosos no plásticos. Los Rodillos Pata De Cabra, tienen su máxima eficacia con los suelos plásticos. Los Rodillos Neumáticos consisten usualmente en una chata soportada por una única fila de 4 ruedas equipadas con neumáticos inflados a presiones que oscilan entre 50 y 125 libras por pulgada cuadrada (3,5 a 9 kg/cm²). Las ruedas están montadas en tal forma que el peso que se transmite desde la chata y se distribuye uniformemente entre las mismas, aun cuando la superficie del terreno no este nivelada.

3. Compactación de Arcillas: Si el contenido natural de humedad de una arcilla en el préstamo no está próximo al óptimo, puede resultar muy difícil llevarlo a dicho valor óptimo sobre todo si el contenido natural de humedad es demasiado alto. Por ello, el contratista puede verse obligado a utilizar la arcilla con un contenido de humedad no muy diferente del que tiene en la naturaleza. Las excavadoras extraen el material de los préstamos en pedazos o terrones. Ahora bien, un terrón o trozo individual de arcilla no puede compactarse con ninguno de los procedimientos mencionados previamente, pues tanto las vibraciones como las presiones de corta duración solo producen un cambio insignificante en su contenido de humedad. Los rodillos pata de cabra son, sin embargo, efectivos para reducir el tamaño de los espacios abiertos existentes entre los terrones. Se obtienen los mejores resultados cuando el contenido de humedad es ligeramente superior al límite plástico. Si es mucho mayor, la arcilla tiene

tendencia a pegarse al rodillo, o bien este a hundirse en el terreno. Si es mucho menor, los terrones no se deforman y los espacios quedan abiertos.

4. Compactación de Suelos No Cohesivos: Son suelos compuestos de rocas, piedras, Gravas y arenas, o sea suelos de granos gruesos. En el caso de suelos granulares el proceso de compactación más adecuado resulta el de la vibración, pero debe tenerse en cuenta, como ya se sabe, que el comportamiento de los suelos gruesos depende mucho de la granulometría. Se requiere una fuerza moderada aplicada en una amplia área, o choque y vibración. La compactación eficiente en los suelos cohesivos requiere presiones más altas para los suelos secos que para los húmedos, pero el tamaño del área cargada no es crítico. La eficiencia se mejora aumentando la presión durante la compactación a medida que el peso específico y la resistencia aumentan.

REFERENCES

- [1] Warren, F. Freddy, S. Mario, V. Diagnosticar las condiciones intermedias de compactación en el suelo. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43626961021.pdf>, 2006.
- [2] Dania, N. Francisco, G. Correlaciones entre métodos convencionales y alternativos para estimar la resistencia y compactación de suelos. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/256>, 2004.
- [3] Marina, R. Jesús, D. Comparación entre los distintos métodos de compactación de suelos mezclados con cemento y su eficiencia ambiental. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4848427>, 2014.
- [4] Javier, F. Oscar, R. Dolly, M. Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación Proctor. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1075>, 2007.
- [5] Romer, O. Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación. <https://www.redalyc.org/pdf/1939/193949520004.pdf>, 2016.
- [6] Ruben, C. Hugo, F. Generalidades sobre compactación de suelos. https://www.researchgate.net/profile/Hugo_Begliardo/publication/264847957_generalidades_sobre_compactacion_de_suelos7links/5502dc770cf231de076fb5c3/generalidades-sobre-compactacion-de-suelos.pdf, 2005.
- [7] Ciro, T. Evaluación del empleo de concreto compactado con rodillo en los pavimentos: impacto técnico y económico. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2394>, 2014.
- [8] Martín, A. Optimización del proceso de compactación mediante el control de humedad en pavimentos urbanos de Huancayo. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/2893/3/Resume_n_Alcoser_Porras_2016.pdf, 2016.
- [9] Carlos, B. Soluciones dinámicas para la compactación de suelos in situ en estructuras de pavimentos. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15183/u753810.pdf?sequence=1>, 2017.
- [10] A. Rico, H. Del Castillo. Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte. <https://trid.trb.org/view/990198>, 1992.
- [11] Manuel, R. Yeison, B. Método y equipos de compactación de suelos. <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/3390>, 2015.
- [12] Fernando, V. Consideraciones básicas sobre compactación de suelos. <https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/10027/000128300.pdf>, 1987.
- [13] Rubén, R. Hugo, B. Generalidades sobre compactación de suelos. https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Begliardo/publication/264847957_GENERALIDADES SOBRE COMPACTACION DE SUELOS/links/5502dc770cf231de076fb5c3/GENERALIDADES-SOBRE-COMPACTACION-DE-SUELOS.pdf, 2005.
- [14] Forsythe, W. Freddy, S. Mario, V. Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43626961021.pdf>, 2005.

- [15] Cristian, G. Armando, M. Luis, M. Farei, M. Efecto del uso de materiales reciclados y métodos de compactación en las propiedades mecánicas e índice de reflectancia solar del hormigón permeable. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071850732015000300001&lang=es, 2015.
- [16] Miguel, H. Ciro, I. Darina, L. Fidel, N. Jaime, R. Omar, G. Elvis, L. Sensor para la medición continua de la compactación del suelo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900024&lang=es, 2012.
- [17] Edward C. Jorge T. Número de ciclos patrón a nivel de capa de afirmado para obtener el óptimo grado de compactación, utilizando métodos: cono de arena y densímetro nuclear; en el acceso principal a conga, Cajamarca 2015. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/9428>, 2015
- [18] Omar G, Miguel H, Ciro, Iglesias C, Elvis L. Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000300013, 2013.
- [19] Miguel H, Ciro I, Darina L, Omar G, Elvis L. . Desarrollo de un sensor para la medición continua de la compactación del suelo. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000100001&lang=es, 2011.
- [20] Alfonso R, Hermilo C. Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt7.pdf>, 1992.
- [21] N. C. Vasquez, I. B. Bellido, R. K. M. Chipana and D. N. V. Villegas, "Soil Analysis for the Execution of the Foundations," *2021 IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/EIRCON52903.2021.9613661.