

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL CON
MENCIÓN EN CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES



Tesis para optar el Grado Académico de Maestro
en Ingeniería Vial

**Metodología De Relación Para Evaluar La Compactación En
Capas Granulares De Un Pavimento Flexible**

Autor: Bach. Matías Santos, Roberto

Asesor: Mg. Francisco Antonio, Aramayo Pinazo

LIMA – PERÚ

2021

Página del jurado

Doctor Alfonso Ramón Chung Pinzás
Presidente

Magister Juan Antonio Quea Vásquez
Miembro

Magister José Luis Ponce Filios
Miembro

Magister Francisco Antonio Aramayo Pinazo
Asesor

Representante de la EPG

Dedicatoria

A Dios por permitir que pueda dar este paso que marca mi vida profesional, donde con su gracia y misericordia he podido terminar satisfactoriamente esta etapa de vida.

A mi amada esposa Betty quien me ha acompañado y me ha ayudado en todos los momentos de esta aventura de vida profesional.

A mis hijos, por permitirme dejarles este legado de vida

A mis padres y mi familia.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por permitirme tener vida, salud y los medios para poder lograr esta meta trazada.

Agradezco a mi esposa por confiar en mi capacidad de enrumbar en este reto.

A mis hijos, por darme un poco de sus tiempos para poder lograr esta meta trazada.

Agradezco a mis padres y quienes apostaron por mí.

Índice de contenido

Página del jurado	v
Dedicatoria	vi
Agradecimiento	vii
Índice de contenido	viii
Listado de tablas	x
Listado de figuras	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Descripción del Problema	2
1.2 Formulación del Problema	5
1.2.1 Problema General	5
1.2.2 Problemas específicos	5
1.3 Importancia y Justificación del Estudio	6
1.4 Delimitación del Estudio	9
1.5 Objetivos de la investigación	11
1.5.1 Objetivo general	11
1.5.2 Objetivos específicos	11
2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2.1 Marco Histórico	12
2.2 Investigaciones Relacionadas con el Tema	15
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	29
2.4 Definición de términos básicos	34
2.5 Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis	35
2.6 Hipótesis	36

2.6.1 Hipótesis general	36
2.6.2 Hipótesis Específicas.....	36
3 CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	38
3.1 Tipo, Método y diseño de la Investigación.....	38
3.2 Población y muestra.....	39
3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	39
3.4 Descripción de procedimientos de análisis.....	42
3.4.1 Metodología de relación de prospección	42
3.4.2 Metodología de relación de densificación del suelo	46
3.4.3 Metodología de relación de resistencia del suelo	50
4 CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	52
4.1 Resultados.....	52
4.1.1 Metodología de relación de prospección	52
4.1.2 Metodología de relación de densificación del suelo	52
4.1.3 Metodología de relación de resistencia del suelo	52
4.2 Análisis de resultados	53
4.2.1 Metodología de prospección.....	53
4.2.2 Relación de densificación del suelo.....	55
4.2.3 Relación de resistencia del suelo.....	57
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS	63
ANEXOS	68

Listado de tablas

Tabla 01: Correlaciones del módulo obtenido por el LWD VS otros equipos.....	18
Tabla 02: Resumen de LWD y sus características.....	23
Tabla 03: Resumen de LWD y sus características.....	32
Tabla 04: Requerimientos granulométricos para base granular – gradación B	33
Tabla 05: Requerimientos de agregados gruesos para base granular	33
Tabla 06: Requerimientos de agregados finos para base granular.....	33
Tabla 07: Requerimientos de agregados para base granular.....	34
Tabla 08: Variable independiente y variable dependiente de la hipótesis general	37
Tabla09: Variable independiente y variable dependiente de cada hipótesis específica	37
Tabla 10: Técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
Tabla 11: Matriz de análisis de datos.....	41
Tabla 12: Parámetros de bondad de ajuste.....	42
Tabla 13: Auscultación de datos de deflexión y módulos resilientes.	45
Tabla 14: Características de la estructura de un pavimento.....	45
Tabla 15: Datos de deflexión – capa base granular	46
Tabla16: Deflexión máxima – capa granular.....	48
Tabla 17: Resultados de grado de compactación y deflexión.....	49
Tabla 18: Parametro de bondad de ajuste – relación del grado de compactación y deflexión	50
Tabla 19: Deflexión máxima – capa granular.....	51
Tabla 20: Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 01	54
Tabla 21: Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 02	56
Tabla 22: Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 03	59
Tabla 23: Matriz de Consistencia	70
Tabla 24: Matriz de operacionalización.....	72
Tabla 25: Confiabilidad y validez.....	74

Listado de figuras

Figura 01: Ubicado de la vía conectora N° 17, progresivas Km. 0+500 y Km 2+200	10
Figura 02: Ilustración el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando.....	15
Figura 03: proceso constructivo del experimento relleno.....	20
Figura 04: Esquema de mediciones en la base de la plataforma	21
Figura 05: proceso constructivo del experimento plataforma	21
Figura 06: Esquema de estructura utilizada en la modelación.....	23
Figura 07: Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia	26
Figura 08: Vista de la aplicación de la carga al espécimen contra el tiempo.	26
Figura 09: Valores medios de módulo de resiliencia para diferentes granulometrías	27
Figura 10: Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador.....	29
Figura 11: Deflectómetro de impacto Liviano LWD “Keros Prima 100 Portatil”	31
Figura 12: Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis.....	36
Figura 13: Esquema del tipo de diseño de la investigación – descriptiva comparativa.	39
Figura 14: Equipos Light Falling Weight Deflectometer y densímetro nuclear.....	40
Figura 15: Máxima densidad seca y optimo contenido de humedad.....	43
Figura 16: Calibración de porcentajes de compactación densímetro nuclear vs cono de arena.....	44
Figura 17: Mapa conceptual de una metodología de prospección.....	46
Figura 18: Grado de compactación con la deflexión.	50
Figura 19: Relación de % de compactación vs módulo dinámico de deformación.....	51
Figura 20: Instrumentos utilizados.	73

RESUMEN

El enfoque que tiene esta investigación es cuantitativo, que surge ante el problema causado por el deterioro de un pavimento, como huecos, ahuellamientos, hundimientos, trazándose como objetivo determinar una metodología de relación a fin de evaluar, la compactación de las capas granulares de un pavimento, a través de una ecuación lineal obtenida con las datas de campo. Para solucionarlo, previo a la ejecución de capas estructurales de suelos en un pavimento flexible, se recurrió, al estudio de los materiales, correlación de equipo del cono de arena con el densímetro nuclear y el uso del equipo LWD para obtener, una metodología de prospección del suelo, que proporcione datos de campo en capas granulares de un pavimento flexible. Al término de la conformación de capas granulares, se realizó ensayos in situ con un equipo liviano portátil denominado Light Falling Weight Deflectometer y densímetro nuclear, el cual, con la data proporcionada, se determinó una metodología de relación de soporte estructural que, determina el grado de compactación usando el equipo LWD, relacionando los resultados de densidad y deflexión. Con los datos de modulo dinámico proporcionados por el equipo Light Falling Weight Deflectometer y datos de grado de compactación proporcionado por el equipo densímetro nuclear, se determinó una metodología de relación de resistencia estructural, obteniendo como resultado en una ecuación lineal un parámetro de bondad R^2 está entre 0.70 a 0.89, considerado como una aceptación de resultados buenos.

Palabras clave: Metodología de relación, compactación, resiliencia.

ABSTRACT

The approach to this research is quantitative, which arises from the problem caused by the deterioration of a pavement, such as hollows, hollowings, sinkings, aiming to determine a relationship methodology in order to evaluate, the compaction of the granular layers of a pavement, through a linear equation obtained with field data. To solve this, prior to the execution of structural layers of soils on a flexible pavement, a material survey methodology was used to correlate sand cone equipment with the nuclear density meter and the use of LWD equipment to obtain a soil prospecting methodology, which provides field data in granular layers of a flexible pavement. At the end of the conformation of granular layers, on-site testing was carried out with a portable lightweight equipment called Light Falling Weight Deflectometer and nuclear density meter, which, with the data provided, a structural support ratio methodology was determined that determines the degree of compaction using the LWD equipment, relating density and deflection results. With the dynamic module data provided by the Light Falling Weight Deflectometer team and compaction grade data provided by the nuclear density meter equipment, a structural capacity ratio methodology was determined, resulting in a linear equation an R2 goodness parameter is between 0.70 and 0.89, considered to be an acceptance of good results.

Keywords: Relationship methodology, compaction, resilience.

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Vial, es desafiada constantemente con buscar nuevas estrategias, metodologías y procesos para mitigar el deterioro superficial y estructural que presentan las estructuras de un pavimento flexible en el Perú, en el cual, durante su etapa de construcción, existen pérdidas de tiempos y recursos en las repeticiones de ensayos con equipos tradicionales para lograr liberar una capa granular compactada.

Por lo descrito en el párrafo anterior, la presente investigación, consta de una metodología de relación para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible, donde se obtiene una metodología de relación de prospección de datos, metodología de relación de densificación del suelo y metodología de relación de resistencia del suelo, haciendo uso de un equipo L.W.D en la en la vía conectora N° 17 entre las progresivas Km. 0+000 y Km 0+750, de la obra pavimentación de la CFD Productos frescos, futura conexión al intercambio vial a desnivel el Sol.

Para la realización del ensayo haciendo el uso del equipo L.W.D, se tomó en consideraciones su manual de uso del equipo para recolectar datos de deflexión y módulos resilientes en una capa granular conformada, simultáneamente se realizó en el mismo punto de ensayos con un equipo densímetro nuclear para recolectar datos del grado de porcentaje de compactación, al conseguir esta data recolectada de campo se realizó la metodología de prospección de datos.

Posteriormente se determinó una metodología de relación entre grado de compactación y deflexión con las datas de prospección para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible mediante ecuaciones lineales.

También, se desarrolló una metodología de relación entre el grado de compactación y módulo dinámico para evaluar la resistencia del material en capas granulares de un pavimento flexible mediante ecuaciones lineales.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema

En el país, los deterioros que presentan los pavimentos como, fallas estructurales y/o funcionales, es debido a uno de los problemas del control riguroso de la compactación, al término de la conformación de capas granulares de una estructura de pavimento flexible, provocando el incumplimiento de su vida útil con la que fue diseñada. Así como precisan los siguientes investigadores:

Llosa (2006), realizó una tesis denominada “propuesta alternativa para la distribución racional del presupuesto anual municipal para el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos (aplicación municipio de la Molina)”, donde indica que la falla estructural en vías del distrito de la Molina, se encuentran deteriorados la estructura del pavimento, esta debido a la conformación de los materiales de la estructura del pavimento flexible, también por su sometimiento a repeticiones de cargas vehiculares livianos o pesados. Es decir por los materiales y cargas suministradas al pavimento llegan a tener fallas estructurales o funcionales como fisuramientos, agrietamiento, piel de cocodrilo debido a la deformación o la tensión horizontal por tracción en las capas granulares y carpeta asfáltica, llegándose a dominar falla por fatiga.

Rebolledo (2010), realizo una tesis denominada “deterioros en pavimentos flexibles y rígidos” Consecuentemente, donde indica que, las fallas del pavimento de la red vial.

Ricardo (2010), indica que se debe tratar de determinar la falla del pavimento, donde se debe evaluar si esta falla fue provocada es por un deficiente diseño de pavimento, la suministración de cargas altas suministradas al pavimento, afectaciones por el agua al pavimento, la temperatura con la que está sometido constantemente el pavimento, la calidad de los materiales usados para su construcción del pavimento o la deficiencia constructiva. Para estas evaluaciones, se realizan mediante inspecciones visuales, realización de ensayos destructivos (calicatas) y ensayos no destructivos como viga Benkelman, FWD y otros que sirven para evaluar y determinar la capacidad estructural del pavimento y la composición de la estructura del pavimento (subrasante, sub base, base y carpeta asfáltica).

La ASTM International D 6433-07, precisa que, para la integridad y condiciones operacionales de la estructura del pavimento el índice de condición es un indicador numérico que califica las condiciones funcionales y estructurales, obteniendo mediciones actuales, basados en la observación de fallas.

Paucar (2017), realizó una tesis denominada “diagnóstico y diseño vial del pavimento flexible: Avenida Alfonso Ugarte, provincia de Huancayo 2016”, donde indica que el deterioro de la vía se mitigará al realizar un monitoreo mediante un método que podrá identificar las necesidades de rehabilitación y/o mantenimiento de pavimentos.

Según el manual de ensayo de materiales del MTC-E-117 (2017), toman en consideración, el procedimiento del ensayo del cono de arena en campo para determinar la densidad y peso unitario del suelo (Método (MTC E -117) y/o densímetro nuclear (Método MTC E- 124) (MTC-E-124) densidad in situ con el densímetro nuclear, estos equipos utilizados en el ensayo, sirven para liberar la compactación de capas granulares, provocan problemas de pérdida de tiempo en la producción para construir las capas granulares de un pavimento flexible, estas traen también por consecuencia, pérdidas económicas por equipos de espera para completar su ciclo de productividad.

Otro problema, es la pérdida de tiempo y recursos, a las repeticiones de ensayos en campo con los equipos tradicionales para lograr liberar capas granular compactada y obtener grados de compactación según lo requerido en las especificaciones generales 2013 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Otro problema, es que solo se basan a controles de densidad de compactación a la estructura de pavimento en el entendido que se diseña con parámetros muy importantes como: Módulo de resiliente (Mr), Correlaciones entre MR y CBR.

Angelone (2000), menciona que, se evidencia dejando registros establecidos durante el término de ejecución de capas granulares de una estructura de pavimento, controlando los materiales utilizados para cada capa a conformar de la estructura, donde estos cumplan los requerimientos mínimos del valor de CBR (California Bearing Ratio). y en su mayoría solo se controlan en laboratorio y no siempre se durante la construcción de cada capa

estructural de un pavimento, considerando que no es importante o relevante conocer el comportamiento de las capas estructurales de un pavimento y verificar el grado de compactación durante la ejecución.

También indica que, al no realizar el seguimiento del grado de compactación en capas del pavimento in situ, no se logra controlar la calidad de la estructura del pavimento con la que se va ejecutando con el fin de cumplir con el periodo de vida proyectado, teniendo en conocimiento que todo diseño tiene una estimación de periodos de diseño.

No es una correcta metodología constructiva el no dejar los registros de evidencias en el comportamiento al interior de la estructura de pavimento: Modulo de resiliente, comportamiento de las deflexiones siguiendo sus parámetros de registro.

Se necesita corroborar los parámetros: módulo de resiliencia, M_r y humedad de trabajo que aporta eficiencia a la estructura propuesta por el desarrollo del comportamiento de la estructura del pavimento, es necesario conocer o determinar las deflexiones.

En el manual de ensayo de materiales del MTC (2017), no existe un procedimiento para recolectar datos de campo haciendo uso del equipo LWD en capas granulares de un pavimento flexible y obtener grado de compactación.

Por consecuencia existen metodologías, procedimientos, guías para recolectar datos de campo al usar un equipo portátil para solucionar este vacío, por lo que surge el siguiente problema

¿De qué manera una metodología influye en recolectar datos de campo en capas granulares de un pavimento flexible, haciendo uso de un equipo portátil?

En el manual ensayo de materiales del MTC (2017), no cuenta con un procedimiento y/o metodología para relacionar entre el grado de compactación y deflexión con los datos suministrados por el equipo LWD y Densímetro nuclear sucesivamente, esta con el fin de obtener un grado de compactación haciendo uso el equipo portátil en capas granulares de un pavimento flexible y obtener su grado de compactación.

Sin embargo, existen metodologías, procedimientos y/o, guías para correlacionar el grado de compactación, con las deflexiones y módulos resiliente, que solucionaría estos problemas, por lo que surge el siguiente problema.

¿De qué manera una relación entre grado de compactación y deflexión influye en la compactación en capas granulares de un pavimento flexible?

En el manual ensayo de materiales del MTC (2017), no existe una metodología y/o procedimiento para relacionar entre el grado de compactación y módulo de dinámico de deformación, con los datos suministrados por el equipo LWD y densímetro nuclear mutuamente, esta con el fin de obtener un grado de compactación haciendo uso de un el equipo portátil, LWD en capas granulares de un pavimento flexible y obtener su grado de compactación.

Por consiguiente, un equipo portátil, mediante metodologías, procedimientos, y guías podría solucionar el problema descrito en el párrafo anterior, por lo que surge el siguiente problema:

¿De qué manera se encuentra una relación entre grado de compactación y modulo dinámico de deformación en capas granulares de un pavimento flexible?

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿De qué manera una metodología de relación evalúa la compactación en capas granulares de un pavimento flexible?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿De qué manera una metodología de relación de prospección influye en recolectar datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible?

- b. ¿De qué manera una metodología de relación de densificación del suelo influye en un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible?
- c. ¿De qué manera una metodología de relación de resistencia del suelo influye en un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible?

1.3 Importancia y Justificación del Estudio

IMPORTANCIA

Con una metodología de relación evalúa el grado de compactación garantizando rápidamente el monitoreo y control de los parámetros de aceptación de capas de suelos estructurales de un pavimento flexible en la etapa de construcción.

Esta investigación es importante porque proporciona relaciones que ayuda a obtener, en forma rápida, grados de compactación y módulos resilientes.

Esta metodología de relación evalúa la compactación en capas de suelos de un pavimento flexible a través de una representación gráfica, obtenida con las datas de campo haciendo uso de un equipo Light Falling Weight Deflectometer.

Esta metodología de relación provee valores, con la que verifica y controla, la compactación en capas del suelo de un pavimento flexible durante su construcción, induciendo la continuidad en la ejecución de capas de suelos de un pavimento flexible y dar al país obras viales de calidad.

Es importante, aportar con una metodología de prospección del suelo, para obtener datos de soporte estructural extraídos al realizar los ensayos en campo. Siendo esta metodología para recolectar datos para luego realizar metodologías de relación.

La metodología de relación de densidad y deflexión obtiene valores de compactación en capas de suelos de un pavimento flexible durante su ejecución.

Esta metodología de relación de densidad y deflexión sirve para cada capa estructural, según su composición estructural del pavimento flexible a nivel de suelos. Esta verificará

en corto tiempo y mínimos recursos, si la compactación se encuentra dentro de los parámetros de control establecidos en la EG 2013, con el fin de asegurar su calidad de estructural, mitigando fallas estructurales.

La importancia de una metodología de relación de densidad y modulo dinámico de deformación con el fin de obtener un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible, al término de la conformación de capas estructurales. Siendo relevante, ya que verifica en corto tiempo con el módulo resiliente de campo su compactación, con el fin de asegurar la resistencia del material del suelo.

Los beneficiados con esta metodología de relación son las empresas constructoras y laboratorios de suelos, ya que inmediatamente después de conformar algún componente de la capa estructural de suelos de un pavimento flexible a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo mediante el equipo portátil LWD, se podrá verificar su grado de compactación, llegando a optimizar recursos y tiempos en la construcción.

JUSTIFICACIÓN

Justificación teórica

Aporta conceptos teóricos en el cálculo de las deflexiones llenando algunos vacíos de conocimiento, ya que, al tener una metodología de relación para suelos, se obtiene el grado de compactación a través de una representación gráfica obtenida con los datos de campo, haciendo uso del LWD.

Una metodología de prospección generará una nueva teoría para recolectar datos de soporte estructural en cada capa del pavimento.

Una metodología de relación de densidad y deflexión podrá usar en otros proyectos viales.

Una metodología de densidad y modulo dinámico de deformación podrá usar en otros proyectos viales.

Una metodología de relación generará una nueva teoría para obtener el grado de compactación en capas de suelos de un pavimento flexible, ofreciendo posibilidades fructíferas de explorar metodologías a través de una representación gráfica obtenida con los datos de campo haciendo uso del equipo LWD.

Con una metodología de relación se espera que proporcione resultados de grado de compactación similares a los resultados generados por el equipo densímetro nuclear.

Al lograr obtener resultados similares a través de una representación gráfica obtenida con las datos de campo con el equipo LWD, facilitara evaluar el grado de compactación en las capas de suelos de un pavimento flexible durante su ejecución.

Proponer una metodología de relación, tiene como fines de usar un equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer para realizar ensayos en capas de suelos.

Justificación práctica

Mejorar el control de los parámetros de diseño y el seguimiento constructivo a las estructuras de un pavimento.

Una metodología de relación, facilitarán en corto tiempo y con pocos recursos realizar una evaluación del grado de compactación estructural de capas de suelos de un pavimento flexible.

Permitirá verificar su grado de compactación de las capas conformadas inmediatamente después de realizar el ensayo.

El equipo LWD, es de fácil uso y no presenta mayores riesgos para la integridad física del operador.

Justificación metodológica

contar con una metodología de relación para medir el grado de compactación, son conseguidos mediante una prospección en campo, metodología de relación densidad y deflexión, y una metodología de relación de densidad y modulo dinámico de deformación

a través de una representación gráfica mediante ensayos realizados con el equipo portátil LWD.

Esta metodología de relación ayudara como base para generar otras metodologías y/o procesos, en capas de suelos de un tipo de estructuras de pavimentos flexibles, a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, mediante un equipo portátil LWD.

Se tendrá una percepción, al uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer, ya que servirá para evaluar el grado de compactación de un pavimento flexible, mediante unos modelos de ajuste de carga.

1.4 Delimitación del Estudio

La presente investigación se realizó en la vía metropolitana Km 1+550, de la ciudad de Lima - Perú específicamente de la delimitación espacial es, en la vía conectora N° 17 entre las progresivas Km. 0+000 y Km 0+750, de la obra pavimentación de la CFD Productos frescos, futura conexión al intercambio vial a desnivel el Sol.

Delimitación espacial

Una estructura de los pavimentos flexibles.

Delimitación temporal

- Comienza en conocer el componente de la capa granular de un pavimento.
- La conformación de una capa granular de un pavimento en obra.
- Realización de ensayos en gabinete

Realizar una metodología y obtener el ordenamiento de las datas de campo entre % de compactación y deflexión como también la relación de porcentaje (%) de compactación y el Módulo resiliente (Mr).

Durante la ejecución de una estructura de pavimento, para cada capa de suelos, se realizó ensayos a los materiales utilizados, se realizó ensayos de deflexión y módulo resiliente en campo con un equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer.

Con datos del ensayo, proporcionados por el equipo portátil LWD, se determinará una metodología de prospección, metodología de relación de densidad y deflexión, y metodología de relación de densificación y resistencia del suelo para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

Delimitación teórica

Se tendrán en cuenta los siguientes conceptos: deflexión, módulo resiliente, grado de compactación caracterización del suelo, cargas, uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer, uso del densímetro nuclear.

En la figura 01, se muestra la ubicación de un tipo de estructura de pavimento ubicado en la vía conectora N° 17, entre las progresivas Km. 0+000 y Km 0+750, conexión a la obra intercambio vial a desnivel el Sol, según la Red Vial Nacional Longitudinal de la costa sur Ruta PE-1S, SINAC (D.S 011-2016-MTC).



Figura 01: Ubicación de la vía conectora N° 17, progresivas Km. 0+500 y Km 2+200
Fuente: Google Maps

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Proponer una metodología de relación a fin de evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible a través de datos de campo usando un equipo LWD.

1.5.2 Objetivos específicos

- a. Determinar una metodología de relación de prospección para recolectar datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible.
- b. Determinar una metodología de relación de densificación del suelo con el fin de obtener un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.
- c. Determinar una metodología de relación de resistencia del suelo con el fin de obtener un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Histórico

Es probable que por casualidad se haya aprendido históricamente que la compactación de un suelo y su densificación por medio de equipos mecánicos presenta mejor comportamiento mecánico, comparado con los suelos en estado natural.

Ejemplo de esto, sucede con obras tales como los Bordos, construidos en China antes de nuestra era, así como los caminos construidos por los antiguos Mayas en México. La compactación en suelos ha sido realizada para obtener estructuras de pavimentos más duraderos y con mejores propiedades mecánicas.

Con la constante frecuencia de obras relacionadas al movimiento de tierras, en la tercera década del siglo XX se inició a controlar la compactación en diferentes partes del mundo, primordialmente en Estados Unidos.

En 1928 y 1929, O .J. Porter, realizaron en la División de Carreteras de California investigaciones básicas en laboratorio que permitieron el inicio de la aplicación de las técnicas de compactación a la construcción de carreteras.

En 1933, las investigaciones realizadas con el Proctor dieron como resultado técnicas que en la actualidad son usadas. Estas investigaciones trajeron en estandarizar métodos para la especificación y controles de trabajo de campo en el laboratorio. Indicando que, aplicándose una cierta energía de compactación, sea con un equipo en un número de pasadas, o en laboratorio con un número de golpes en un suelo dentro de un molde, la densidad resultante es función de la humedad en la que el suelo estuviere.

En el 2013, establecieron los requisitos mínimos de compactación en las especificaciones técnicas generales 2013 del ministerio de transporte y comunicaciones.

Actualmente, los ensayos de campo para obtener el grado de compactación en capas granulares es por medio del ensayo del proctor modificado, el ensayo de cono de arena

y/o densímetro nuclear, las mismas que se encuentran en el Manual de Ensayo de Materiales (2014) del ministerio de transportes y comunicaciones.

Una vez conocido la evolución de la compactación de suelos, se indica que, para obtener la metodología de relación para evaluar la compactación en capas granulares, es necesario conocer la evolución de la deflexión y módulos resilientes, el cual, se muestran a continuación:

Deflexión de campo

Desde el año 1952, la “Western Association of State Highway Organizations” (WASHO) de los Estados Unidos de América inició con el equipo denominado Viga Benkelman, para la evaluación de pavimentos, mediante la medición de curvas de deflexiones sobre pavimentos en servicio. Esta metodología de análisis con las curvas de deflexión permite determinar la capacidad estructural del pavimento siempre y cuando se conozca los espesores de las capas del mismo. A esta metodología de evaluación se la denominaba “No destructiva”, comparada con las tradicionales “Destructivas”, que requerían el conocimiento de los espesores de la estructura del pavimento con mayor frecuencia. La primera, aunque se denomine “No destructiva”, requiere también el conocimiento de estos espesores, pero con menor frecuencia.

Con referencia al deflectómetro de impacto liviano LWD, AASHTO TP-456-2017 el inicio de la realización de este ensayo fue desarrollado en 1981, el cual consiste en un peso que cae e impacta a una placa, produciendo una aplicación de carga; con la información de la aplicación de carga, la deformación y la geometría del área de contacto de la placa hacia el suelo, se calcula el módulo de deformación mecánica (E) usando la solución elástica lineal, (Osorio, 2008), teniendo como base principal, el uso de una tecnología similar a la de los equipos de ensayo FWD, con la diferencia principal que la carga es reducida (Fleming, 2001) (Fleming, 2001).

Con el pasar de los años el uso del Deflectómetro de impacto liviano (LWD) se ha ido incrementando, al punto que este equipo está abriendo la posibilidad de ser usado como una herramienta para realizar el control de calidad en la construcción de estructuras de pavimento, así como para la investigación de materiales y construcción de vías, (Fleming,

2006) (Fleming P. R, 2006), posterior a esto se están incorporado nuevas tecnologías ha impulsado a dejar sus aplicaciones de los métodos convencionales que se basan en las relaciones de pesos unitarios secos, (Fleming, 2006), fundamentando la utilización del LWD como una herramienta para la obtención de los módulos de las capas granulares.

Módulo Resiliente de campo

Pérez (2004), precisan que para atender el agrietamiento por fatiga en la superficie de la capa asfáltica es necesario conocer el modulo dinámico de elasticidad en la subrasante de un pavimento flexible y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación.

Hveem (1955), desarrolló el tema “comportamiento resiliente de los pavimentos”. Propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes. Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem, donde denominaron al módulo resiliente a la aplicación de cargas repetidas.

Seed, Chan, & Lee (1962), definió el termino de módulo resiliente como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable.

Anguas y Martínez (2004), tuvieron una experiencia donde realizaron aplicaciones de carga triaxial a través de cargas de presión axial separados por un intervalo de carga a una muestra de suelo compactado. A la vez ejercieron una presión de confinamiento constante por lo que determinaron el máximo esfuerzo desviador repetido (σ_d) y la deformación axial recuperable (ϵ_r). Llegando a obtener la siguiente expresión del módulo resiliente:

$$Mr = ((\sigma_1 - \sigma_3)) / ((\epsilon_{axial})) = \sigma_d / \epsilon_{axial}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Esfuerzo principal menor

Durante pruebas para suelos finos y materiales granulares al aplicar cargas repetidas llega en un punto que, el módulo resiliente es constante donde asumen que el suelo es elástico. A esa constante de elasticidad lo denominaron módulo de resiliencia.

En la figura 02, se muestra las cargas repetidas y la recuperación de estas deformaciones del suelo al que lo denominaron módulo resiliente. .

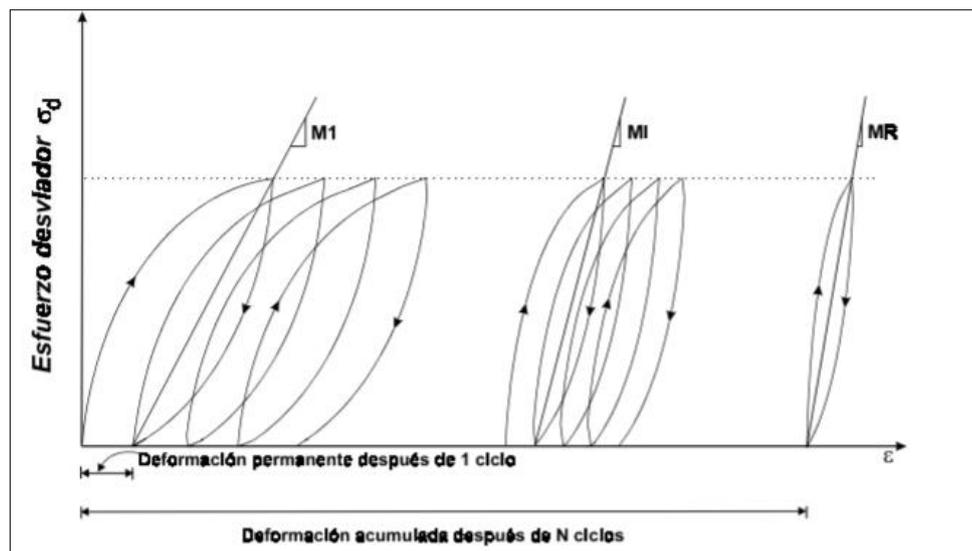


Figura 02: Ilustración el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando

Fuente: Sanfadila, Qro.2001

El tipo de material es un factor que afecta el Módulo de resiliencia por sus características como rigidez, tamaño máximo de partículas, angularidad, rugosidad, granulometría, contenido de humedad, dureza, etc.

2.2 Investigaciones Relacionadas con el Tema

Jiménez (2019), proporciono un artículo “Comparación en campo con deflectómetro liviano en la evaluación de rigidez in situ usado en el control de compactación”. Este artículo se realiza con el objetivo de hacer una comparación entre el procedimiento propuesto por (Marradi, 2011). Propone el uso del deflectómetro de impacto liviano (Leight Weight Deflectometer) como equipo de control de compactación comparando a los resultados obtenidos con el densímetro nuclear. Indica que tradicionalmente se usa el

equipo viga Benkelman o los deflectómetro de impacto de carga pesada (Falloing Weight Deflectometer y Heavy Weight Deflectometer). La función de este equipo es realizar ensayos en el pavimento para calcular su rigidez y luego evaluar su estado actual, diseñar una rehabilitación y controlar la calidad dentro del proceso constructivo correspondiente. Este equipo LWD generan una gran cantidad de data al realizar el ensayo de calidad en capas granulares, proveyendo de muchos datos que son necesarios para el control, por ello, estos equipos son de fácil uso, económicos y brindan resultados confiables en el área de ingeniería, los cuales difieren de las prácticas empíricas. Además, cabe resaltar que una propuesta importante para el control de calidad de pavimentos en el Perú es realizar un control rápido y de bajo costo, de la rigidez obtenida en las labores de compactación en la construcción de un firme. En lo descrito, su estudio fue en comparar su procedimiento compuesto por Marradi et al, para la utilización del Deflectómetro de impacto Liviano (LWD) como herramienta para verificar el grado de compactación, y el resultado obtenido con densímetro nuclear (ND).

El resultado obtenido bajo una regresión lineal se identificó un incremento o disminución de 1% de compactación obtenido con el densímetro nuclear se tiene una variación de 10.30% y 12.34%.

Cano (2014), desarrollo una tesis denominado “validación de la determinación de la densidad in situ, en un tramo del proyecto “Collas – Tabalela, donde uso el equipo densímetro eléctrico con el fin de comparar con el equipo densímetro nuclear y el cono de arena”, desarrollado el año 2014. Con esta investigación demostraron la existencia de relación entre los resultados de la densidad seca y contenido de humedad obtenidos con el densímetro eléctrico y luego compararlos con los mismos datos obtenidos con el cono y arena y el densímetro nuclear. Referente al método del densímetro eléctrico, es un método novedoso y no reconocido para su uso, por lo que, los métodos tradicionales como el densímetro nuclear y cono de arena, ayudaran a comparar con sus resultados que brinden para analizar su relación. Esta investigación se desarrolló en un tramo de la carretera Collas – Tababela, donde seleccionaron 25 puntos aleatoriamente, para cada punto se realizó el ensayo con el densímetro nuclear, densímetro eléctrico y cono de arena obteniendo los resultados de densidad seca y el contenido de humedad obteniendo la densidad seca y contenido de humedad, luego, realizo una correlación y un análisis de varianza entre el densímetro eléctrico y el densímetro nuclear y el densímetro eléctrico

y el cono de arena. Compararon los resultados entre el cono de arena y el densímetro nuclear y eléctrico, obteniendo e que estos métodos tiene una baja correlación, concluyendo que, los resultados de densidad seca y humedades usando el densímetro nuclear, cono de arena y densímetro eléctrico no llegan a tener alguna relación.

Gil (2011), investigo el grado de “Comparación entre densímetro nuclear con el cono de arena para el control de compactación de suelos”, esta fue publicado en Abril del 2011. Esta investigación, se desarrolló con el fin de comparar estadísticamente el grado de compactación, dichos grados de compactación de obtuvieron realizando ensayos in situ con el equipo densímetro nuclear, densímetro eléctrico y cono de arena. Inicialmente compararon los resultados obtenidos con el densímetro nuclear con el cono de arena para dar confiabilidad a los equipos tradicionales, esta también para dar uso de un equipo denominado densímetro eléctrico sobre el densímetro nuclear, llegando a concluir que, entre los equipos usados como: el cono de arena, densímetro nuclear y densímetro eléctrico, no presentan diferencias significativas, dando a usar cualquiera de estos equipos para la realización del ensayo y obtener su resultado para el tipo de suelo areno – arcilloso (SC). Concluye también que, para el uso del equipo del cono de arena es muy demoroso y produce gastos al realizar el ensayo y obtener el grado de compactación, también indica que por ser empírico y mecánico existe mayor participación del personal para obtener el resultado lo que podría incurrir en algún error al comparar con el densímetro nuclear y eléctrico.

Salamanca (2020), desarrollo en un proyecto de infraestructura vial el control de calidad de compactación en capas granulares usando el equipo Leight Weight Deflectometer a travez de graficas de curvas de calibración.

Como se aprecia la Tabla 01, presenta Correlaciones del módulo obtenido por el LWD VS otros equipos.

Tabla 01:

Correlaciones del módulo obtenido por el LWD VS otros equipos.

	Correlación	Autor	Observaciones
FWD	$M_{FWD} = 1,031 * E_{LWD}$	Fleming et al,2000	Medidos de una base granular de 250 mm apoyada sobre arcilla, con un R^2 de 0,7.
	$M_{LWD} = 0,97 * E_{FWD}$	Nazzal,2003	Base granular de 450 mm apoyada sobre una arcilla limosa $R^2 = 0,6$
	$M_{LWD} = 1,21 * E_{FWD}$	UK Performance Based	Subrasante tratada con cal y cemento de 260mm, $R^2 = 0,77$.
	$M_{LWD} = 0,8 * a_1 * 1,3 * E_{FWD}$	Specification,2006	Graba bien graduada de 225 mm, $R^2 = 0,5$
	$MTFT = 0,96 * ELWD$	Fleming et al.,2000	Capa granular de 500mm, $R^2 = 0,92$
	$\log \left[\frac{k_{lwd}}{k_{30}} \right] = 0,31 * \log(k_{lwd}) + 1,12$	Kamiura et al.,2000	Subrasante que contenía suelo volcánico y arena limosa
OTROS EQUIPOS /METODOS	$M_{PLT}(R^2) = 20,0 + 0,69ELWD$ $CBR = -14 + 0,66ELWD$	Nazzal,2003	Suelo estabilizado con cemento y cal $R^2 = 0,83$

Leyenda:

LWD: Deflectómetro de impacto liviano.

FWD: Deflectómetro de impacto pesado.

CBR: Relación de soporte de california.

TFT: Deflectómetro de impacto liviano -TFT.

PLT: Prueba de carga estática.

Fuente y Elaboración: Salamanca (2020)

Osorio (2008), indica que se puede establecer una metodología para el uso del equipo Leight Weight Deflectometer realizando ensayos in situ con el fin de obtener la capacidad portante de la capa granular de pavimentos flexibles, esta mediante la evaluación del módulo resiliente obtenidas con el equipo. Estas evaluaciones son importantes ya que, se usará como guía general la evaluación de los materiales ensayados. Sin embargo, para cada proyecto en particular donde se utilice el LWD se deberá llevar a cabo la metodología de evaluación. Esta metodología mitigara un problema general de inconsistencia en el uso de parámetros entre las etapas de: diseño, especificación y construcción de las mismas.

Osorio (2008), desarrolló una investigación en la localidad de Chacay (VIII Región), donde realizo una excavación de 3 m de ancho x 3 m de largo y profundidad de 0,70 m, una vez llegado al fondo de excavación se procedió a realizar relleno y compactación con un material de base, con espesores de 5 cm. luego, en la superficie compactada se realizó ensayos con el equipo Leight Weight Deflectometer.

El proceso constructivo se visualiza en la Figura 03. Para verificar el nivel de compactación de cada capa se midió con el Densímetro Nuclear en la subrasante y en el relleno en los espesores de 15 cm, 30 cm y 50 cm. Y para contar con una medición de comparación de los valores del LWD se realizaron mediciones con el Cono Dinámico de Penetración en el suelo de subrasante, y en el material de relleno en dos etapas, cuando el espesor de las capas fue de 30 cm y 50 cm. En la Figura 3, se muestra un proceso constructivo del experimento relleno. El Deflectómetro de Impacto Liviano (Light Weight Deflectometer – LWD) es un equipo que permite evaluar en terreno el MR de las capas granulares y subrasante de un pavimento.

Diversos estudios afirman que este equipo puede ser usado confiablemente para evaluar la capacidad estructural de estas capas, sin embargo, a la fecha aún se tiene información limitada sobre su eficacia.

El presente estudio se enfocó en analizar las variables más importantes requeridas para definir la utilización del LWD como herramienta de control en terreno.

Se determinó que la repetibilidad del equipo es alta. Por otro lado, al comparar las mediciones de las distintas configuraciones del LWD, se encontró que la variabilidad

obtenida al realizar las mediciones con un mismo plato a distintas presiones es baja. Además, los módulos que entrega el equipo muestran una tendencia de similitud alta con los valores módulos compuestos calculados por el método Shell, en capas granulares de espesores entre 25 y 30 cm.

A partir de estos resultados, se propone una metodología de evaluación in-situ el MR de las capas granulares de un pavimento a través de un procedimiento experimental que deberá realizarse para cada proyecto en particular.



Figura 03: proceso constructivo del experimento relleno

Fuente: Osorio 2018

Este experimento se desarrolló también en el terreno destinado a acopio de materiales en la localidad de Chacay (VIII Región).

El mismo consistió en construir una plataforma compuesta de una carpeta de material de base granular. La plataforma fue de 4 m de ancho x 7 m de largo.

La mitad del largo quedó con un espesor de 15cm y la otra mitad con 30cm, que fue construida en dos capas de 15 cm (Figura 04). Así también en la (figura 05) el proceso constructivo del experimento plataforma.

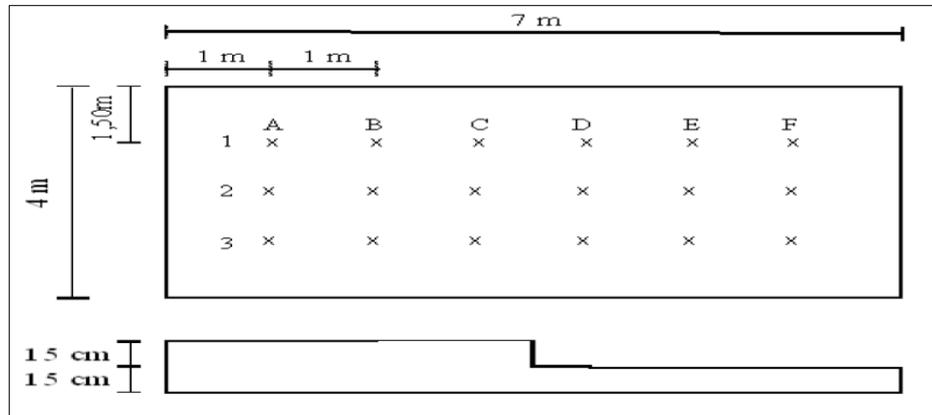


Figura 04: Esquema de mediciones en la base de la plataforma
Fuente: Osorio 2018



Figura 05: proceso constructivo del experimento plataforma
Fuente: Osorio 2018

La investigación plantea una metodología de recolección de datos y Proponer una metodología para el uso del deflectómetro de impacto liviano en la evaluación in-situ de la capacidad de soporte de capas granulares, por lo que el investigador debió proponer a una estructura de estudio en condiciones de extremas de clima y precipitación, por lo en nuestro país cuenta con 3 regiones diferentes a las de chille.

Rodriguez (2018), El objetivo general de la investigación es conocer el alcance del Módulo Elástico de bases granulares obtenido a través del LWD mediante el uso de celdas de presión. En base a lo expuesto, las hipótesis planteadas para la presente investigación son las siguientes:

- El uso de celdas de presión permite verificar la validez del Módulo Elástico obtenido por el Deflectómetro de Impacto Liviano.
- La capacidad de soporte de la subrasante y el espesor de la base granular influyen en el valor efectivo de Módulo Elástico del LWD en bases granulares.

Cual instrumentación de recolección de datos. Diseño experimental, corresponde a la definición de las variables experimentales. Se consideraron materiales y espesores de capas granulares que se utilizan típicamente en la construcción de caminos en Chile.

Rada y Witczac (2019) evaluaron 271 resultados de pruebas obtenidos de 10 diferentes agencias de investigación y encontraron que las variables que más influyen en el módulo de resiliencia de los materiales granulares son: el estado de esfuerzo, el grado de saturación y el grado de compactación.

Para materiales triturados angulosos, un incremento en el contenido de agua conduce a una disminución del módulo de resiliencia. Especímenes con alto peso volumétrico seco tendrán altos valores de módulo de resiliencia.

Resultados similares fueron reportados por Zaman (citado en Ping Tiam et al), encontrando además que el peso volumétrico seco estuvo determinado por la granulometría usada, independientemente del tamaño del espécimen, para la misma energía de compactación.

Thompson (2019) reportó que para granulometrías que solamente difieren en porcentajes permisibles de material menor que 0.075 mm, se tienen pequeñas diferencias en el módulo de resiliencia; sin embargo, materiales de granulometría más abierta, con pocos finos, son menos sensibles a los cambios de humedad y generalmente constituyen base granulares de mejor comportamiento.

Money (2009), indica que el LWD ha sido diseñado de tal manera que la carga que aplica se asemeja a las condiciones que está sometida una base o subbase granular comúnmente y la correcta selección de configuración de platos y pesos es necesaria para simular de mejor forma estas condiciones de trabajo. Con el objetivo de conocer las tensiones a las que están sometidas estas capas, se realizó un análisis mediante el software mePads (Figura 06). El modelo consiste en aplicar una carga que corresponde a un eje equivalente (eje simple y rueda doble). La tabla 05 presenta el resumen sobre estructuras de similares características.

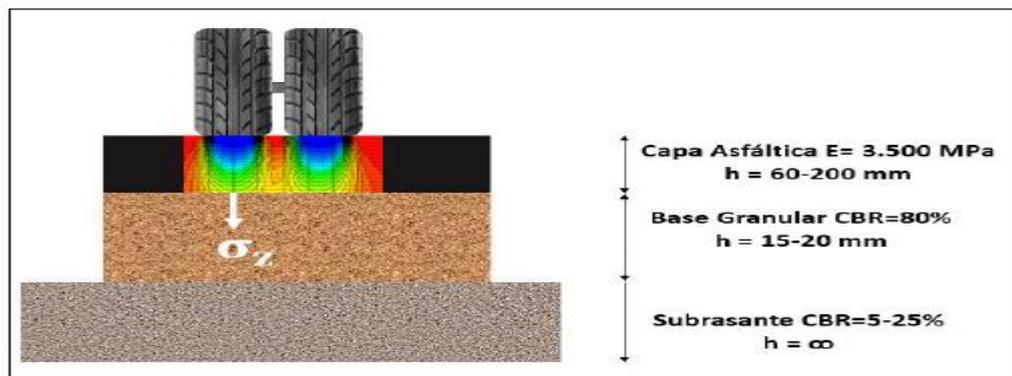


Figura 06: Esquema de estructura utilizada en la modelación
Fuente: Money 2019

Tabla 02:
Resumen de LWD y sus características.

Estructura	Base Granular			Subrasante	
	CBR (%)	E (Mpa)	Espesor (h1) mm	CBR (%)	E (Mpa)
1	80	250	150	5	130
2	80	250	200	5	130
3	80	250	150	25	49
4	80	250	200	25	49

Fuente: Money (2020)

La metodología de investigación se basa principalmente en un trabajo de terreno con ensayos a escala real en donde se configuran diferentes estructuras de pavimento. La investigación también incluye un programa de ensayos de laboratorio para la evaluación de los suelos que se utilizarán en las diferentes configuraciones.

García, Anguas, Vargas y Espino (2012), en la evaluación del módulo de resiliencia, en trayectorias de humedecimiento y secado, propone el problema. Cuando se utilizan diseños de pavimento de tipo mecanicista, el parámetro principal para evaluar el

comportamiento de los materiales ante carga es una propiedad que describe la rigidez de los materiales. Este parámetro ha sido denominado “módulo de resiliencia”. Esta característica de los materiales, sin embargo, no se mantiene constante después de la construcción de la estructura; sino que varía con las condiciones ambientales que se presenten en el lugar. Por tanto, es de suma importancia que de alguna forma se puedan predecir sus variaciones para que sean tomadas en consideración en el diseño de la estructura de tal forma que el pavimento funcione adecuadamente.

Varios artículos relacionados con el tema muestran que cuando los materiales de textura fina incrementan su contenido de agua, su resistencia disminuye. Este tipo de material (y por la estructuración considerada en los pavimentos de tipo flexible), forma parte ya sea de la cimentación del pavimento o de las capas de terraplén o subrasante. Por tanto, es fundamental que al llevar a cabo el diseño del pavimento se consideren las variaciones ya mencionadas. La forma en la que se hace es por medio de un modelo o relación que indica en qué cantidad se reduce o se incrementa el módulo de resiliencia, ante una ganancia o pérdida en su contenido de agua.

De este modelo depende, en gran medida, el grado de aproximación entre las predicciones que realiza el modelo y las condiciones reales. del módulo elástico de bases granulares obtenido a través del deflectómetro de impacto Liviano. Menciona en los últimos años el Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD por su sigla en inglés) ha ganado popularidad ya que permite obtener el Módulo Elástico de bases y subbases granulares de pavimentos in situ de manera fácil y rápida. No obstante, hay autores que cuestionan el alcance de estos resultados. No existe evidencia en la literatura que valide el uso de este Módulo para la evaluación de la capacidad de soporte de las capas granulares del pavimento. Se construyeron estructuras de prueba compuestas por una base granular de material seleccionado sobre subrasantes de CBR conocidos y se instalaron celdas de presión en la interfaz de ambas capas con el fin de verificar la validez del Módulo obtenido a través de la carga aplicada por el LWD. Se demostró que se puede utilizar el Módulo Elástico del LWD para el cálculo de tensiones. Se determinaron coeficientes de ajustes (f) en función del tipo de estructura y la carga aplicada. Estos factores se recomiendan para realizar cálculos preliminares en estructuras de similares características a las del presente trabajo. Se demostró que las mediciones del LWD son influenciadas por las propiedades

mecánicas de la subrasante y, del espesor de la base granular de forma similar al cálculo de Módulo Compuesto de la Formula Shell.

Cual plantea un objetivo de. Determinar la variación del módulo de resiliencia cuando el material sufre ciclos de humedecimiento o secado y si es posible determinar un modelo matemático que describa dicho comportamiento.

Antes de llevar a cabo la determinación de las propiedades mecánicas de cada suelo, se determinaron las propiedades índice propiedades índices de acuerdo con los procedimientos ASTM. Estos incluyeron los procedimientos de límites de consistencia (ASTM D 4318), peso específico relativo de sólidos (ASTM D854) y material más fino que para la malla No. 200 (ASTM D 1130).

Procedimiento de prueba, el protocolo utilizado en el estudio corresponde al protocolo NCHRP 1-28^a denominado “Determinación del módulo de resiliencia para diseño de pavimentos flexibles”. Para llevar a cabo este tipo de prueba, se requiere de un equipo triaxial capaz de aplicar cargas en forma cíclica y que además cuente con los sensores adecuados para determinar las deformaciones que se presenten en el espécimen. Para las pruebas que se llevaron a cabo en este trabajo, se utilizó el equipo triaxial cíclico que se muestra en la figura 16. La carga se aplica con una función senoidal con un desfase de 270° (Figura 08); el tiempo de aplicación de la carga es de 0.2 de segundo con un período de descanso de 0.8 de segundo. Esto se repite para el número de ciclos que se requieran aplicar al espécimen. En la prueba se aplican una serie de esfuerzos desviadores, así como presiones de confinamiento.

En la figura 07, se muestra un equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia



Figura 07: Equipo triaxial para determinar el módulo de resiliencia
Fuente: García, Anguas, Vargas y Espino (2012)

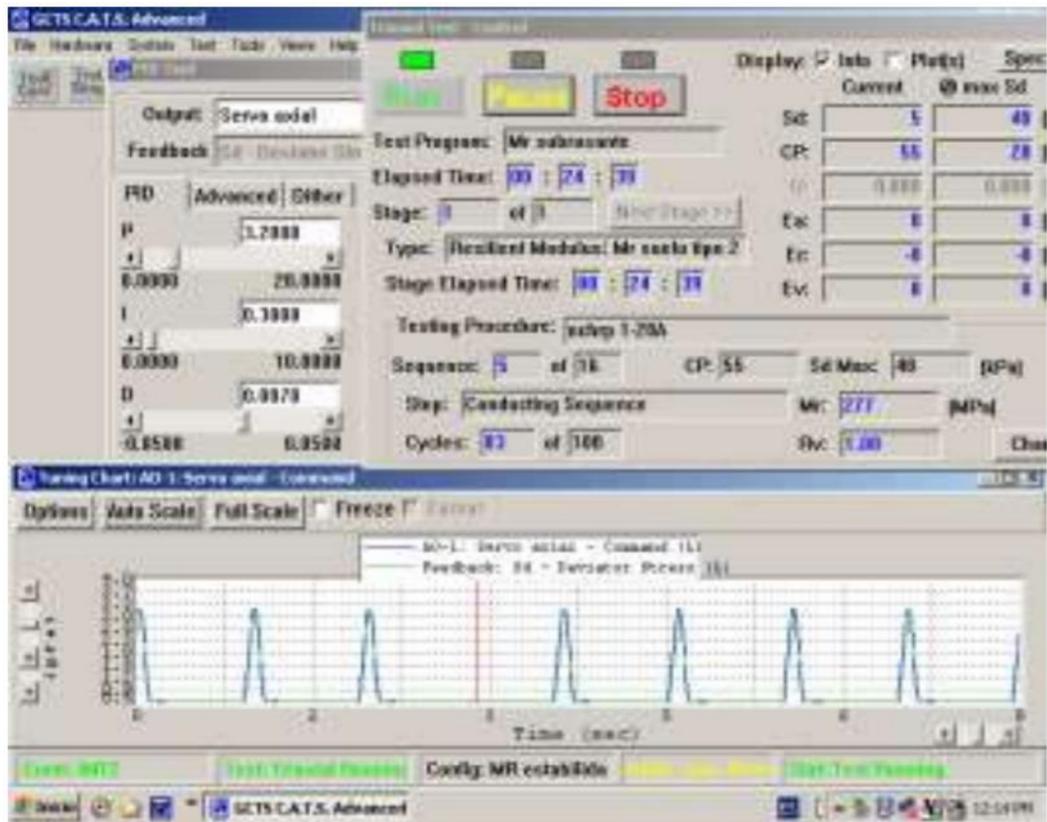


Figura 08: Vista de la aplicación de la carga al espécimen contra el tiempo.
Fuente: García, Anguas, Vargas y Espino (2012)

Pérez (2000), en su investigación reporta los resultados de un estudio realizado con dos materiales granulares que se utilizan comúnmente en la construcción de subbases y bases de pavimento en Oklahoma, los cuales se trabajaron con tres granulometrías y tres contenidos de agua diferentes, a fin de conocer la influencia de estas características en su comportamiento esfuerzo-deformación. Las tres diferentes granulometrías empleadas se muestran en la (Figura 35). Los contenidos de agua fueron los correspondientes a la óptima (4.6 a 6.3 %), 2% menor y 2% mayor.

El procedimiento de prueba en todos los ensayos fue el AASHTO T294-94 para materiales tipo 1.

En los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se observó que la variación del módulo de resiliencia debida a las diferencias de granulometría fue de 10 a 50% y de 0 a 22% para los materiales 1 y 2, respectivamente.

(La Figura 09) muestra gráficamente los valores de módulo de resiliencia obtenidos para diferentes niveles de esfuerzo, en el material preparado con tres diferentes granulometrías.

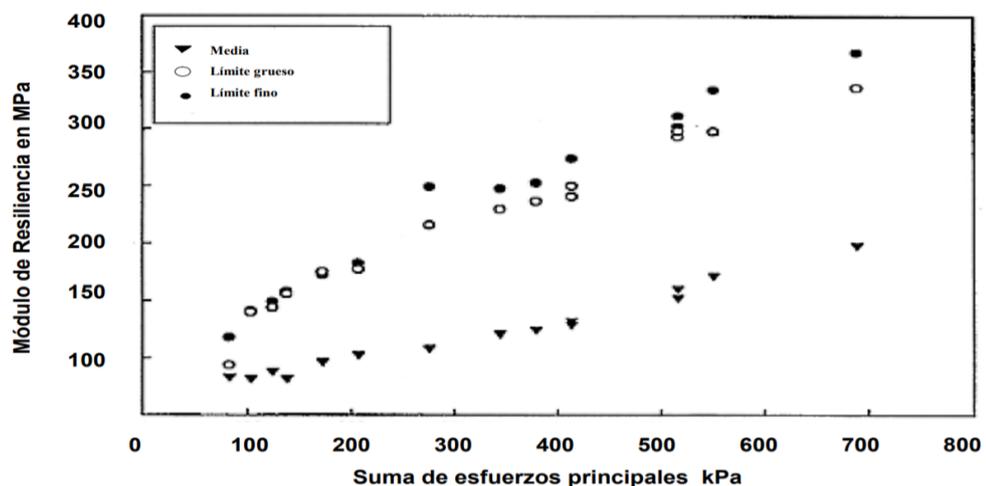


Figura 09: Valores medios de módulo de resiliencia para diferentes granulometrías
Fuente: Caracterización de la sollicitación en pavimentos.

Se aprecia que salvo para niveles de esfuerzo muy pequeños, el módulo de resiliencia disminuye conforme el contenido de agua se incrementa.

Rada y Witczac (citados en Ping Tiam, et al) evaluaron 271 resultados de pruebas obtenidos de 10 diferentes agencias de investigación y encontraron que las variables que más influyen en el módulo de resiliencia de los materiales granulares son: el estado de esfuerzo, el grado de saturación y el grado de compactación.

Para materiales triturados angulosos, un incremento en el contenido de agua conduce a una disminución del módulo de resiliencia. Especímenes con alto peso volumétrico seco tendrán altos valores de módulo de resiliencia.

Resultados similares fueron reportados por Zaman (citado en Ping Tiam et al), encontrando además que el peso volumétrico seco estuvo determinado por la granulometría usada, independientemente del tamaño del espécimen, para la misma energía de compactación.

Thompson (citado en Ping Tiam et al) reportó que para granulometrías que solamente difieren en porcentajes permisibles de material menor que 0.075 mm, se tienen pequeñas diferencias en el módulo de resiliencia; sin embargo, materiales de granulometría más abierta, con pocos finos, son menos sensibles a los cambios de humedad y generalmente constituyen base granulares de mejor comportamiento.

Corro (19859, analizó tres materiales de diferente procedencia, identificados como base natural de banco, grava-arena de río y basalto vesicular triturado, cuyas características son similares a las de los materiales que se usan como bases de pavimento en nuestro país.

Como resultado de la experimentación se concluye que para las condiciones estudiadas (materiales de base con porcentajes de agua cercanos al óptimo de compactación), la base natural de banco, la cual no cumple con las especificaciones vigentes en lo referente a granulometría y equivalente de arena, es la que tiene mejor comportamiento resiliente, plástico y de resistencia estática al esfuerzo cortante.

Así entonces, tampoco a un material granular se le puede asignar un módulo de resiliencia único. Su selección debe tomar en cuenta los factores antes mencionados.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

Lorenzini y Arcos (2006), el grado de compactación del terreno en Chile se determina a base de la densidad del suelo, según la norma chilena NCh 1516 Mecánica de suelos - Determinación de la densidad en el terreno - Método del cono de arena, procedimiento con el que se obtienen resultados después de 24 horas. Existe otro método, correspondiente al método nuclear, para el que no existe una norma chilena pero que permite con mayor rapidez determinar la densidad de los suelos.

Seed et al, (1962). Indica que el término de módulo resiliente es definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se representa como sigue:

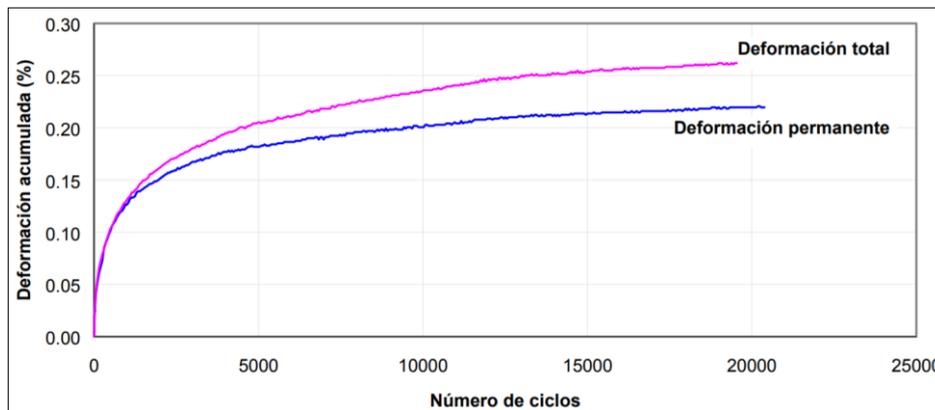


Figura 010: Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador.

Fuente: Caracterización de la sollicitación en pavimentos.

En la Figura 10, se muestra la acumulación de las deformaciones total y plástica durante un cierto número de ciclos.

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en materiales con resistencia a la tensión -carpetas asfálticas o capas estabilizadas- colocados en la parte superior de la estructura, en los que se puede llegar a generar una falla de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto.

La importancia que la deformación tiene en los pavimentos es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es el punto básico a considerar y, de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables

Es muy importante conocer la base teórica para la aplicación de una metodología propuesta para la estructuración de este plan de investigación, se presentó una publicación técnica de una investigación, cuyo título tiene como, Metodología para evaluación de sostenibilidad en autopistas: cálculo de balance energético de la infraestructura García, J. (2012). Con los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología descrita y bases de datos elaboradas al efecto, se podrán valorar los consumos y el balance energético final de una autopista, identificando al tiempo las técnicas más apropiadas desde el punto de vista de su eficiencia energética en todas las fases del ciclo de vida de la infraestructura. La metodología permitirá proponer y promover iniciativas y alternativas que contribuirán a la reducción de los consumos y, en consecuencia, de la huella energética de las carreteras, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso en su conjunto. El objetivo final pretendido es que la eficiencia energética de los procesos, tanto constructivos como de explotación, unidos a la generación de energía procedente de recursos renovables, facilite la obtención de un balance energético neutro o incluso positivo en la consideración global del ciclo de vida de la carretera o autopista.

Livneh y Goldberg (2001), indican que el uso del FWD es poco versátil cuando se trata de caminos con difícil acceso o cuando la frecuencia de mediciones es muy baja. (Fleming, 2001) las cargas aplicadas por este equipo son muy altas cuando se realizan mediciones directamente sobre las bases y subbases granulares en comparación a la condición que estarán normalmente sometidas estas capas.

Para los casos anteriores, es recomendable el uso del Deflectómetro de Impacto Liviano, también llamado LWD por sus siglas en inglés, es un deflectómetro portátil que se utiliza para obtener el Módulo Elástico in situ de bases y subbases granulares y suelos de subrasante (Figura 10). El principio básico del equipo consiste en dejar caer un peso conocido sobre diferentes platos de carga desde una altura determinada y luego medir la deflexión de suelo utilizando un geófono o un acelerómetro ubicado en el centro del plato.

El equipo es de fácil uso y no presenta mayores riesgos para la integridad física del operador.



Figura 011: Deflectómetro de impacto Liviano LWD “Keros Prima 100 Portatil”
Fuente: : (Solminihac, 2008).

La tabla 03 presenta un resumen de los principales modelos disponibles en el mercado con sus principales características.

Para obtener distintos niveles de carga se debe escoger correctamente los pesos y los diámetros de platos.

Tabla 03:
Resumen de LWD y sus características.

Característica	CSM	Zorn	Prima	Loadman	TFT
Estilo del plato	Sólido	Sólido	Anillado	Sólido	Anillado
Diámetro del plato (mm)	200,3	150,200,300	100.200,300	130,200,300	100, 150, 200, 300
Masa del plato (kg)	6,8; 8,3	15	12	6	variable
Masa de caída (kg)	10	10	10,15,20	10	10,15,20
Altura de caída (m)	Variable	0,72	Variable	0,8	variable
Amortiguador	Uretano	Acero	Goma	Goma	Goma
Medición de fuerza	Si	No	Si	Si	Si
Sensor de deformación	Geófono	Acelerómetro	Geófono	Acelerómetro	Geófono
Tiempo de pulso (ms)	15–20	18 ± 2	15–20	25–30	15–25
Carga máxima (kN)	8,8*	7,07*	1-15*	20*	1-15*
Distribución de presión	Definido por usuario	Uniforme	Definido por usuario	Rígido	Definido por usuario
Módulo de Poisson	Definido por usuario	0.5	Definido por usuario	0.5	Definido por usuario

*Dependiente de la altura de caída y del amortiguador

Fuente: Money y Miller 2009

Según las especificaciones técnicas generales (2013), para la capa estructural de base, precisa los requerimientos de las características granulométricas, en la tabla 04, se muestra el requerimiento granulométrico para una gradación B.

Tabla 04:

Requerimientos granulométricos para base granular – gradación B

Abertura	Tamiz	Lím. Inferior	Lím. Superior
50 mm	2"	100	100
25 mm	1"	75	95
9.5 mm	3/8"	40	75
4.75 mm	N.º 4	30	60
2.00 mm	N.º 10	20	45
0.425 mm	N.º 40	15	30
0.075 mm	N.º 200	5	15

Fuente: ASTM D1241

Elaboración: Propia

En la tabla 5, se muestra los requerimientos de las características de los agregados gruesos para ser empleado para una capa estructural de base granular en altitudes menores a 3000 msnm.

Tabla 5:

Requerimientos de agregados gruesos para base granular

Ensayo	Norma	Requerimiento
Partículas con una Cara Fracturada	MTC E 210	80% mín.
Partículas con dos Caras Fracturadas	MTC E 210	40% mín.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	ASTM D 4791	15% máx.
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.

Fuente: Especificaciones Generales 2013 del MTC

Elaboración: Propia

En la tabla 6, se muestra los requerimientos de las características de los agregados finos, para ser empleado para una capa estructural de base granular, en altitudes menores a 3000 msnm.

Tabla 6:

Requerimientos de agregados finos para base granular

Ensayo	Norma	Requerimiento
Índice Plástico	MTC E 111	4% máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	35% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	0.5% máx.

Fuente: Especificaciones Generales 2013 del MTC

Elaboración: Propia

En la tabla 7, se muestra los requerimientos de las características de los agregados, para ser empleado para una capa estructural de base granular.

Tabla 7:
Requerimientos de agregados para base granular

Ensayo	Norma	Requerimiento
Próctor Modificado	MTC E 115	-
CBR *	MTC E 132	100% mín.

Fuente: Especificaciones Generales 2013 del MTC

Elaboración: Propia

2.4 Definición de términos básicos

Metodología: El método es el modelo de trabajo o secuencia lógica que orienta la investigación (Horacio Saldaño,2016, pág. 02)

Relación: Se entiende por relación la conexión de una cosa con otra, o bien la acción y efecto de referir o referirse (Rodríguez Moguel, 2005, pág. 07).

Estructura de pavimento: es la construcción de estructuras de prueba con material seleccionado sobre la subrasante de CBR conocido (California Bearing Ratio).

Compactación: Se entiende por el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. La importancia se estriba en el aumento de resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtienen al sujetar a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco. (Juárez Badillo, Rico Rodriguez,2005, pág. 575)

Densidad: Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad. La densidad de la fase sólida del suelo está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos. (Lourdes Flores,2010, pág. 6)

Contenido de agua o humedad: Es la cantidad de agua contenida en un material, tal como está formado por la suma de agua libre y capilar (Yoner Chavez,2015, pág. 3).

Deflexión: es el desplazamiento vertical de la superficie del pavimento en respuesta a la aplicación de una carga externa. Cuando esta carga se aplica sobre la superficie, todas las capas se deflecan, desarrollándose esfuerzos y deformaciones en cada capa (Quiñonez, 2015, pág. 18).

Módulo resiliente: es la forma de caracterizar la capacidad de soporte de las capas de los materiales que conforman el pavimento, ya que el mismo refleja el real comportamiento de los materiales bajo las cargas de tránsito (Osorio, 2008, pág. 54)

Light falling weight deflectometer: Instrumento que se usa para determinación de las deflexiones de las superficies pavimentadas y sin pavimentar, es ligero, portátil y se utiliza generalmente para el ensayo de las distintas capas granulares que conforman el pavimento (ASTM E2583, 2015, pág. 2).

2.5 Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis

Con una metodología de relación, evalúa la compactación en capas granulares de un pavimento flexible a través de datos de campo usando un equipo LWD.

Por consiguiente, para realizar la evaluación la compactación en suelos a través del equipo Light Falling Weight Deflectometer es necesario saber los conocimientos teóricos de compactación, deflexión y módulo resiliente.

A través de la data de campo, suministrada por el equipo LWD, se realizó una metodología de relación que determina la compactación en capas granulares.

En la figura 12, se muestra un resumen esquemático de la estructura teórica científica, ordenado jerárquicamente con el fin de captar el significado de las hipótesis.

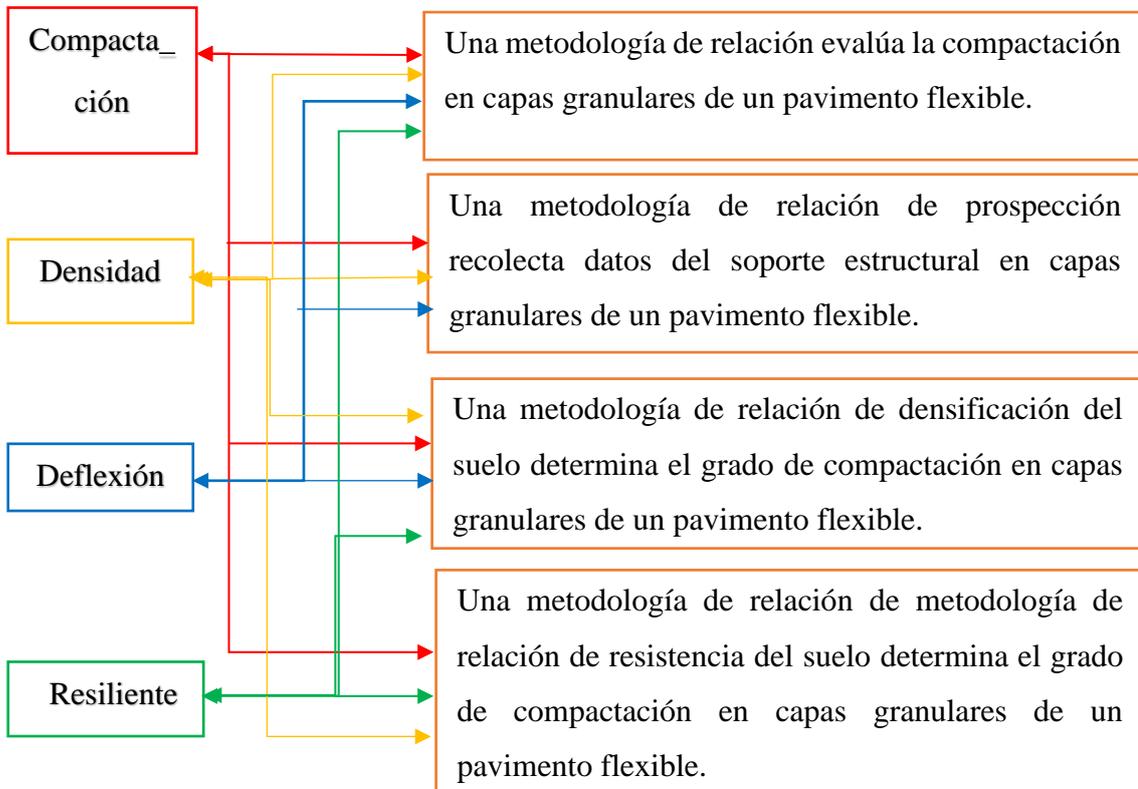


Figura 012: Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis
Fuente y Elaboración: Propia

2.6 Hipótesis

2.6.1 Hipótesis general

Una metodología de relación evalúa la compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

2.6.2 Hipótesis Específicas

- a. Una metodología de relación de prospección recolecta datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible.
- b. Una metodología de relación de densificación del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

- c. Una metodología de relación de resistencia del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

En la Tabla 8, se muestra la variable independiente, variable dependiente de la hipótesis general.

Tabla 8:
Variable independiente y variable dependiente de la hipótesis general

Hipótesis General	Variable independiente	Variable dependiente
Una metodología de relación evalúa la compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	Metodología de relación	Capas granulares de un pavimento flexible

Fuente y Elaboración: Propia

En la Tabla 9, se muestra la variable independiente, variable dependiente de cada hipótesis específica

Tabla 9:
Variable independiente y variable dependiente de cada hipótesis específica

Hipótesis específicas	Variable independiente	Variable dependiente
Una metodología de relación de prospección recolecta datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible.	Metodología de relación de prospección	Datos de soporte estructural
Una metodología de relación de densificación del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	metodología de relación de densificación del suelo	Grado de compactación
Una metodología de relación de densidad y modulo dinámico de deformación determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	metodología de relación de resistencia estructural	Grado de compactación

Fuente y Elaboración: Propia

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo, Método y diseño de la Investigación

Esta investigación es cuantitativa por la medición de sus variables.

El tipo de investigación del presente proyecto de tesis clasifica como aplicado. Según Tamayo (2000) depende de los conocimientos y aportes de la investigación básica. Se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías. Confronta la teoría con la realidad.

El método de investigación del presente proyecto de tesis corresponde al nivel correlacional debido a que estudia la relación asociativa que existe en dos hechos o fenómenos en un contexto determinado.

La investigación es de diseño no experimental, debido a que no hay manipulación de las variables independiente, debido a que es una metodología de relación a través de una representación gráfica, obtenida con las datas de campo haciendo uso del equipo Light Weight Deflectometer, con el fin de comparar las variables.

El diseño de la investigación del presente proyecto de tesis es no experimental debido a que no se varían ni se manipulan en forma internacional las variables que corresponden al hecho o fenómeno estudiado.

En este tipo de investigación pertenece a una descriptiva comparativa debido a que consiste en hacer observaciones (tomar datos: O1,O2,O3) de una muestra M de un mismo fenómeno y luego compararlas.

La muestra de estudio (M) es la estructura de pavimento a nivel de suelos granulares y, el objeto (O) de estudio es la compactación, la deflexión y módulos resiliente con el fin de verificar los resultados con el parámetro de bondad. En la figura 13, se muestra el esquema del tipo de diseño de la investigación – descriptiva comparativa.

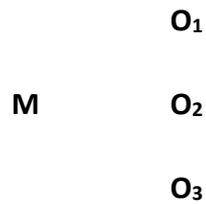


Figura 13: Esquema del tipo de diseño de la investigación – descriptiva comparativa.

Donde:

O₁ = Relación de prospección

O₂ = Relación de densificación del suelo (grado de compactación Vs Deflexión).

O₃ = Relación de relación de resistencia del suelo (grado de compactación Vs módulo dinámico).

3.2 Población y muestra

Para la variable dependiente, se tiene:

Población: Capas granulares de un pavimento flexible

Muestra: Capa base granular

Para la variable independiente, se tiene:

Población: Metodologías

Muestra: metodología de prospección, densificación y resistencia del suelo

La muestra seleccionada, se debieron a sectores donde se ejecutó capas granulares de un pavimento flexible donde se realizó el ensayo de compactación, deflexión y módulo resiliente.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas e instrumentos que se utilizaron en el presente trabajo de tesis, se encuentran en la tabla 10.

Tabla 10:
Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas para emplear	Instrumentos para utilizar
Ensayos de compactación	Densímetro nuclear
Ensayos de deflexión	Light Weight Deflectometer (LWD)
Ensayos de módulo resiliente	Light Weight Deflectometer (LWD)
Metodología de relación	Correlación R

Fuente y Elaboración: Propia

En la figura 14, se muestra la realización de ensayos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer (LWD) y densímetro nuclear (DM) para la recolección de datos de densidad, deflexión y módulos resilientes.

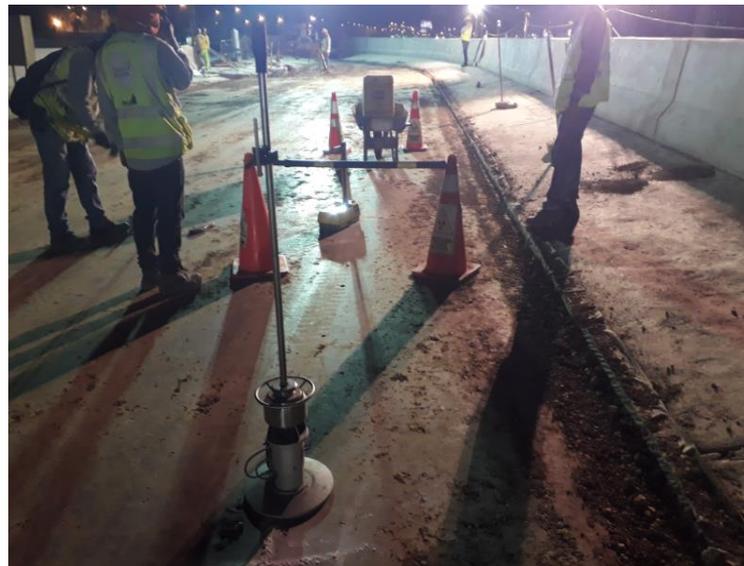


Figura 14: Equipos Light Falling Weight Deflectometer y densímetro nuclear
Fuente y Elaboración: Propia

Para la confiabilidad del instrumento de mediciones, se utilizaron equipos con certificados de calibración. Cada punto de ensayo se realizó simultáneamente con ambos equipos.

Los equipos usados para la recolección de datos y procesamiento de resultados tienen el soporte de normas y/o manuales de ensayos para su validación.

En la tabla 11, se muestra la matriz de análisis de datos.

Tabla 11:
Matriz de análisis de datos

Variable Dependiente	Indicador	Escala de medición	Estadísticos descriptivos	Análisis inferencial
Capas granulares de un pavimento	Densidad	Razón	Tendencia central: media, mediana y moda.	Correlación y regresión
	Deflexión		Dispersión: desviación estándar.	
	Módulo resiliente		Posición: cuartiles. Forma: asimetría y la curtosis.	

Fuente y Elaboración: Propia

Correlación R

Sotil (2015), utilizó ampliamente la medición diferente del grado de correlación entre los valores de laboratorio medidos y las respuestas redichas.

Con las mediciones el investigador obtuvo diferentes ecuaciones y modelos a los cuales se le llama los parámetros de bondad de ajuste entre ellos los que fueron más utilizados y reportados es el coeficiente de determinación (R²), el error estándar de estimación (Se) y la precisión relativa (Se/Sy). Para modelos lineales, el coeficiente de determinación R², es una medida de la precisión del modelo. El error estándar de estimación se refleja el error probable en la predicción.

Sin embargo, es importante reconocer que, para la evaluación de modelos no lineales, el R² no es una buena medida de la precisión del modelo, ya que depende de una separación lineal de las variables. En cambio, la precisión del modelo debe evaluarse mediante la relación de error estándar o la precisión relativa, Se/Sy, donde Sy es la desviación estándar de la variable de criterio. Teniendo el Se / Sy como base, se puede calcular un valor de R² para propósitos comparativos usando la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{(n - v)^*}{(n - 1)} \left[\frac{Se}{Sy} \right]^2$$

Donde:

n = número de muestras

v = número de coeficientes de regresión

A lo largo del análisis estableció un criterio subjetivo para usar adecuadamente estos parámetros de bondad de ajuste; y se muestra en la tabla 12, la cual, es utilizada como base fundamental para el análisis de los resultados de la correlación que se busca en esta investigación

Tabla 12:

Parámetros de bondad de ajuste

Item	CRITERIO	Parámetro de bondad de ajuste	
		R2	Se/Sy
1	Excelente	Superior a 0,90	Más bajo que 0.350
2	Bueno	Entre 0.70 a 0.89	Entre 0.36 y 0.55
3	Regular	Entre 0.40 a 0.69	Entre 0.56 y 0.75
4	Pobre	Entre 0.20 a 0.39	Entre 0.76 y 0.90
5	Muy Pobre	Más bajo que 0.19	Entre 0.90 y 1,00.
6	Sin correlación	Valores imaginarios	Superior a 1,00

Fuente: Andrés Sotil Chavez.

3.4 Descripción de procedimientos de análisis

3.4.1 Metodología de relación de prospección

Densidad de laboratorio de una muestra de suelo es a través de Proctor modificado.

Para encontrar o determinar la densidad máxima seca en laboratorio se realizó a través de la norma de proctor modificado MTC E 115 -2016 “compactación de suelos en laboratorio utilizando la energía modificada (56000 pie-lb/pie³ o 2700 Kn –m/m³”. (MTC E 115, 2016).

Esta investigación es realizada siguiendo cada uno de los pasos establecidos en la norma MTC E 115 - 2016 para la realización del ensayo "Proctor Modificado".

En la figura 15, se muestra la obtención de la densidad del laboratorio, haciendo uso en ensayo de Proctor modificado.

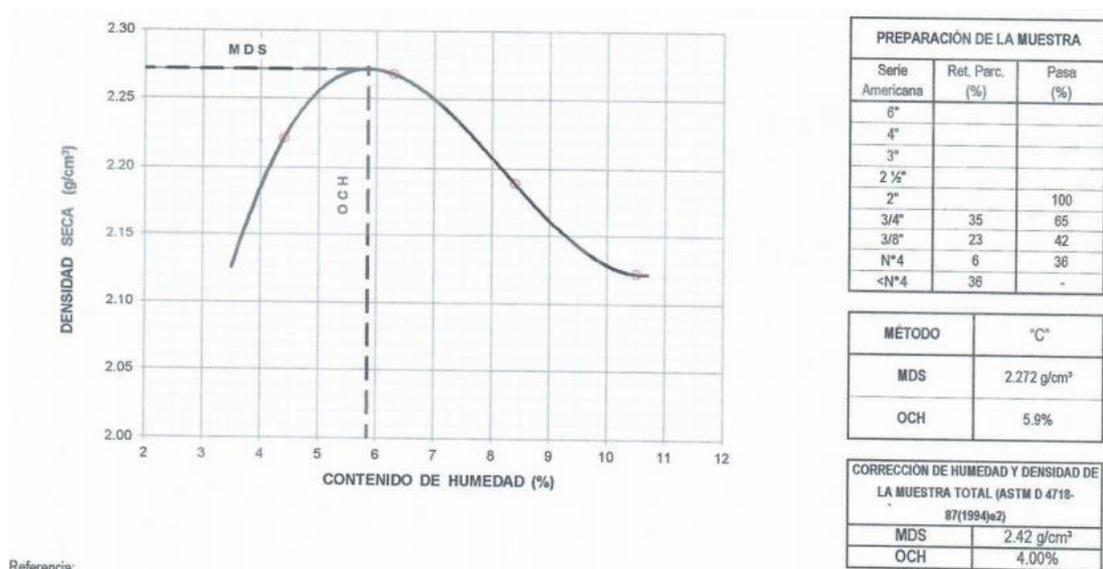


Figura 15: Máxima densidad seca y optimo contenido de humedad.

Grado de compactación con el equipo densímetro nuclear

A través de la relación de densidades obtenidas en laboratorio y campo se realiza cumpliendo con la norma "MTC e 124-2016" "densidad en el sitio – método nuclear a profundidad reducida". Así también La norma ASTM D6938 – 17a "Métodos de prueba estándar para la densidad in situ y el contenido de agua del suelo y el suelo agregado por métodos nucleares (poca profundidad)"

Este método de prueba describe los procedimientos para medir la densidad y la humedad in situ del suelo y de los agregados del suelo mediante el uso de equipo nuclear (en lo sucesivo denominado "medidor"). La densidad del material puede medirse mediante métodos de transmisión directa, retrodispersión o relación de retrodispersión / espacio de aire. Las mediciones del contenido de agua (humedad) se toman en la superficie en el modo de retrodispersión independientemente del modo que se utilice para la densidad.

Esta investigación realiza cada uno de los pasos que estipula la norma MTC E 124 - 2016 con el fin de encontrar densidad de campo y la relación entre la densidad máxima obtenida en campo y la de laboratorio y con ello se obtiene los resultados los grados de compactación en los puntos de inspección.

En la figura 16, se muestra la calibración de porcentajes de compactación densímetro nuclear vs cono de arena.

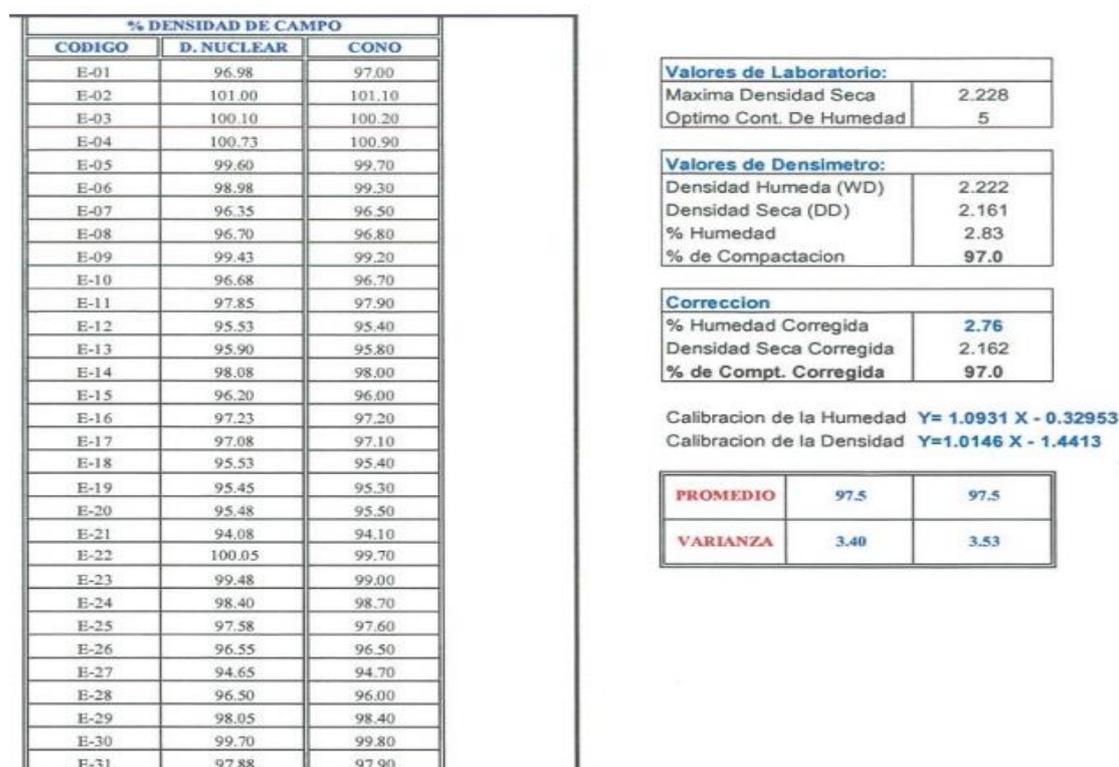


Figura 16: Calibración de porcentajes de compactación densímetro nuclear vs cono de arena.

Deflexión con el equipo Light Falling Weight Deflectometer (LWD)

Para establecer el procedimiento de encontrar el grado de compactación con LWD a través de la relación de Modulo de Resiliente obtenidas en laboratorio y campo se realiza siguiendo lo propuesto en el artículo de Milton Jiménez quien realizó una comparación entre el procedimiento propuesto por Marradi et al y Milton Jiménez para el uso del deflectómetro de peso liviano (LWD) como dispositivo de control de compactación, y el resultado obtenido con densímetro nuclear que fue expuesto en el Congreso Internación de Ingeniería y Dirección de Proyectos.

En la tabla 13, se muestra la auscultación de datos de deflexión y módulos resilientes de campo

Tabla 13:

Auscultación de datos de deflexión y módulos resilientes

ALTURA DE CAÍDA SEGÚN LA ETIQUETA DE CALIBRACIÓN :		0.00 m		HORA :		
CLIMA :		TEMPERATURA: 25.0 °C	ALTITUD: 0.00 msnm	ZONA:		
% DE COMPACTACIÓN :		100.03%		HUMEDAD PROMEDIO DE MUESTRA: 6.00%		
PUNTO DE PRUEBA	MEDICIÓN DE IMPACTO N°	V _{max} [mm/s]	S _{max} () [mm]	Fza.MAX de Impacto (KN)		
1	3 IMPACTOS DE CARGA					
	1	V _{max 1} = 18.30	S _{max 1} = 16.53	7.28		
	2	V _{max 2} = 16.85	S _{max 2} = 15.63	7.25		
	3	V _{max 3} = 16.50	S _{max 3} = 15.14	7.25		
	Valor promedio	V _{max} = 17.22 mm	S _{max} = 15.76 mm	F (KN) 7.26		
	$t_v \text{ [ms]} = \frac{S_{max} \text{ [mm]}}{V_{max} \text{ [mm/s]}} \cdot 1000 =$		$t_v \text{ (ms)} =$	915.51 ms		
	$E_{vd,L} \text{ [MN/m}^2\text{]} = \frac{22.5}{S_{max} \text{ [mm]}} =$		$E_{vd,L} =$	1.5 (MN/m ²) 1.50 MPa		
V _{max} =	Velocidad maxima de deformación					
S _{max} =	Valor promedio de los asentamientos maximos					
t _v	Relación de asentamiento/Velocidad de deformación					
E _{vd,L} =	Módulo dinamico de deformación					

Fuente: Road and Transportation Research Association (2018)

La tabla 14, se muestra las características por capa granular de un pavimento.

Tabla 14:

Características de la estructura de un pavimento

Capa	Espesor (cm)	CBR	E (psi)	μ
Base granular	20	100	30000	0.40
Subbase granular	20	40	16500	0.40
Subrasante		20	17380	0.45

Fuente: Estudio definitivo de ingeniería

Elaboración: Propia.

En la figura 17, se muestra una metodología de relación de prospección el cual recolecta datos de deflexión en capas granulares de un pavimento flexible.

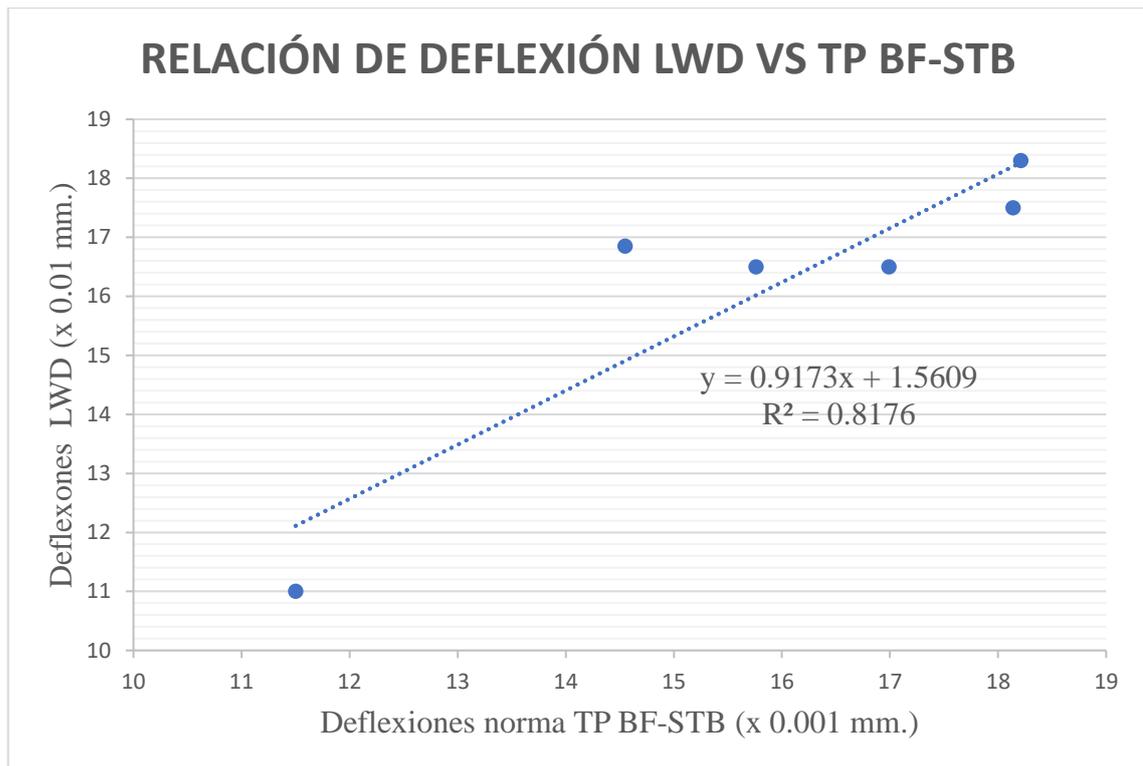


Figura 17: Metodología de relación de prospección.

3.4.2 Metodología de relación de densificación del suelo

En la tabla 15, se muestran los datos obtenidos con el equipo LWD en una capa de base granular, donde proporciona la deflexión a diferentes aplicaciones de carga.

Tabla 15:

Datos de deflexión – capa base granular

Punto No.	No Caída	Fuerza de Impacto KN	Lectura	Deflexión X 0.01 MM	Pulse time (ms)
1	1	7.14 KN	79.66 μ m	7.97 mm	17.05 ms
	2	7.04 KN	78.00 μ m	7.80 mm	18.50 ms
	3	6.66 KN	80.92 μ m	8.09 mm	18.50 ms
	4	7.18 KN	145.38 μ m	14.54 mm	17.03 ms
	5	7.25 KN	165.25 μ m	16.53 mm	16.50 ms
	6	7.28 KN	151.36 μ m	15.14 mm	18.30 ms
	7	7.25 KN	156.25 μ m	15.63 mm	16.85 ms
	8	7.27 KN	122.32 μ m	12.23 mm	17.36 ms
	9	7.31 KN	124.16 μ m	12.42 mm	17.00 ms
2	1	7.27 KN	55.19 μ m	5.52 mm	19.00 ms

	2	7.02 KN	52.76 μm	5.28 mm	18.50 ms
	3	6.94 KN	52.12 μm	5.21 mm	17.50 ms
	4	6.98 KN	52.65 μm	5.26 mm	18.50 ms
	5	6.83 KN	52.04 μm	5.20 mm	18.00 ms
	6	7.04 KN	129.80 μm	12.98 mm	16.50 ms
	7	6.54 KN	143.56 μm	14.36 mm	17.50 ms
	8	7.10 KN	140.60 μm	14.06 mm	16.50 ms
	9	7.85 KN	152.45 μm	15.25 mm	17.25 ms
	1	7.07 KN	81.42 μm	8.14 mm	19.00 ms
	2	7.07 KN	73.58 μm	7.36 mm	19.00 ms
	3	6.86 KN	57.90 μm	5.79 mm	20.00 ms
	4	6.93 KN	122.62 μm	12.26 mm	20.00 ms
3	5	6.91 KN	158.25 μm	15.83 mm	21.00 ms
	6	6.92 KN	192.65 μm	19.27 mm	18.20 ms
	7	7.14 KN	168.10 μm	16.81 mm	16.50 ms
	8	7.85 KN	145.35 μm	14.53 mm	17.00 ms
	9	7.18 KN	185.45 μm	18.55 mm	18.00 ms
	1	7.42 KN	57.18 μm	5.72 mm	19.00 ms
	2	7.16 KN	56.81 μm	5.68 mm	20.00 ms
	3	7.06 KN	58.77 μm	5.88 mm	20.50 ms
	4	7.06 KN	56.26 μm	5.63 mm	18.45 ms
4	5	7.18 KN	57.22 μm	5.72 mm	19.50 ms
	6	7.08 KN	112.25 μm	11.23 mm	16.50 ms
	7	7.13 KN	119.45 μm	11.95 mm	15.50 ms
	8	6.99 KN	129.81 μm	12.98 mm	16.50 ms
	9	7.36 KN	127.40 μm	12.74 mm	15.48 ms
	1	7.30 KN	58.71 μm	5.87 mm	19.00 ms
	2	7.07 KN	57.43 μm	5.74 mm	19.50 ms
	3	7.02 KN	55.65 μm	5.56 mm	19.50 ms
	4	6.93 KN	54.60 μm	5.46 mm	19.50 ms
5	5	6.76 KN	53.25 μm	5.33 mm	20.50 ms
	6	7.05 KN	113.41 μm	11.34 mm	16.50 ms
	7	7.10 KN	113.22 μm	11.32 mm	16.00 ms
	8	7.00 KN	113.65 μm	11.36 mm	16.50 ms
	9	7.12 KN	117.86 μm	11.79 mm	16.00 ms
	1	6.90 KN	61.42 μm	6.14 mm	19.00 ms
	2	6.70 KN	60.14 μm	6.01 mm	18.50 ms
	3	7.02 KN	59.60 μm	5.96 mm	18.00 ms
	4	6.87 KN	59.53 μm	5.95 mm	18.00 ms
6	5	6.69 KN	58.67 μm	5.87 mm	17.50 ms
	6	6.55 KN	60.50 μm	6.05 mm	18.50 ms
	7	7.08 KN	110.42 μm	11.04 mm	17.00 ms
	8	7.10 KN	110.94 μm	11.09 mm	16.00 ms

	9	6.80 KN	114.61 μm	11.46 mm	15.50 ms
7	1	7.13 KN	151.16 μm	15.12 mm	18.00 ms
	2	6.89 KN	140.68 μm	14.07 mm	17.50 ms
	3	6.86 KN	143.10 μm	14.31 mm	18.50 ms
	4	7.05 KN	138.84 μm	13.88 mm	19.50 ms
	5	7.20 KN	141.92 μm	14.19 mm	19.50 ms
	6	6.74 KN	167.13 μm	16.71 mm	16.50 ms
	7	7.44 KN	167.13 μm	16.71 mm	16.50 ms
	8	7.04 KN	165.17 μm	16.52 mm	16.00 ms
	9	0.00 KN	181.43 μm	18.14 mm	16.50 ms
8	1	7.33 KN	91.61 μm	9.16 mm	18.50 ms
	2	7.56 KN	90.04 μm	9.00 mm	18.00 ms
	3	7.14 KN	85.11 μm	8.51 mm	19.50 ms
	4	6.84 KN	82.07 μm	8.21 mm	19.00 ms
	5	7.24 KN	83.77 μm	8.38 mm	17.50 ms
	6	6.99 KN	169.95 μm	17.00 mm	16.00 ms
	7	7.30 KN	171.09 μm	17.11 mm	16.00 ms
	8	4.45 KN	168.61 μm	16.86 mm	16.00 ms
	9	7.08 KN	166.58 μm	16.66 mm	17.00 ms

Fuente y Elaboración: Propia

En la tabla 16, se muestran la deflexión máxima de cada punto de ensayo y coeficiente de variación de la velocidad de impacto y deflexión.

Tabla 16:
Deflexión máxima – capa granular

No.	Orden (ord.)	Fza.MA X de Impacto (KN)	Lectura max. (μm)	V MAX De Deformación (ms)	Deflexión Smax (mm.)	Coefficiente de variación V MAX	Coefficiente de variación S MAX
1	2	7.25	165.25	16.50	16.53	5.54%	4.47%
	4	7.25	156.25	16.85	15.63		
	3	7.28	151.36	18.30	15.14		
2	6	7.85	152.45	17.25	15.25	3.05%	4.24%
	4	6.54	143.56	17.50	14.36		
	5	7.10	140.60	16.50	14.06		
3	3	6.92	192.65	18.20	19.27	5.29%	6.93%
	6	7.18	185.45	18.00	18.55		
	4	7.14	168.10	16.50	16.81		
4	5	6.99	129.81	16.50	12.98	3.68%	4.32%
	6	7.36	127.40	15.48	12.74		
	4	7.13	119.45	15.50	11.95		

	6	7.12	117.86	16.00	11.79		
5	5	7.00	113.65	16.50	11.36	1.77%	2.18%
	3	7.05	113.41	16.50	11.34		
	6	6.80	114.61	15.50	11.46		
6	5	7.10	110.94	16.00	11.09	4.72%	2.04%
	4	7.08	110.42	17.00	11.04		
	6	0.00	181.43	16.50	18.14		
7	3	6.74	167.13	16.50	16.71	0.00%	4.80%
	3	6.74	167.13	16.50	16.71		
	4	7.30	171.09	16.00	17.11		
8	3	6.99	169.95	14.00	17.00	7.22%	0.73%
	5	4.45	168.61	15.80	16.86		

Fuente y Elaboración: Propia

En la tabla 17, se muestra los resultados de grado de compactación haciendo uso del densímetro nuclear y deflexión haciendo uso de un equipo LWD para una carga de aplicación de 7KN.

Tabla 17:

Resultados de grado de compactación y deflexión

Punto No.	DENSIDAD NUCLEAR		LWD	
	% de Compactación	% de Humeda	Fuerza de Impacto KN	DEFLESIONES MAX (mm.)
1	100.90%	6.00%	7.00	15.76
2	99.60%	6.40%	7.00	14.55
3	98.50%	5.60%	7.00	18.21
4	102.85%	6.00%	7.00	11.50
5	98.30%	5.60%	7.00	18.14
6	99.60%	5.80%	7.00	16.99

Fuente y Elaboración: Propia

En la gráfica 18, se muestra gráficamente la relación del grado de compactación con la deflexión, obteniendo una $R^2 = 0.83$.

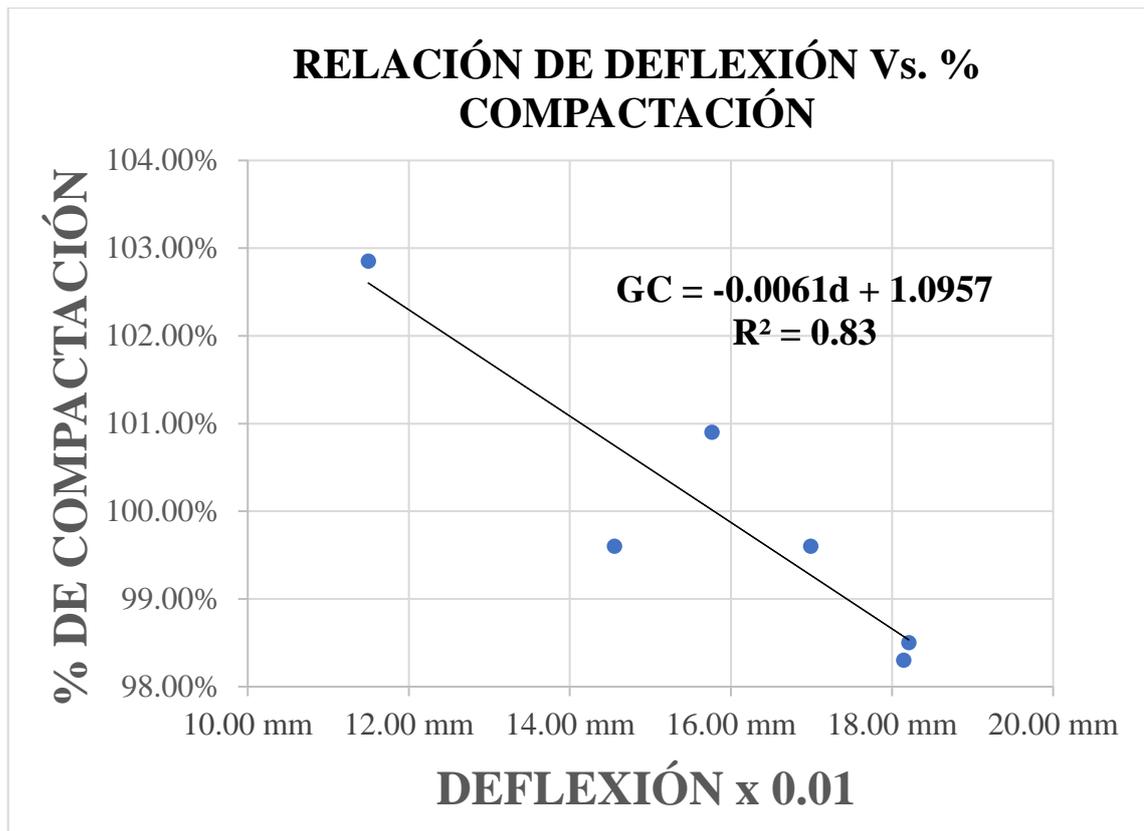


Figura 18: Grado de compactación con la deflexión.

En la siguiente tabla 18, se muestra el parámetro de bondad de ajuste de relación de densidad y modulo dinámico de deformación con el fin de obtener un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

Tabla 18:

Parametro de bondad de ajuste – relación del grado de compactación y deflexión

S_y	S_e	S_e/S_y	CRITERIO R^2	R^2
0.015541419	0.00629	0.40472494	Bueno	0.83

3.4.3 Metodología de relación de resistencia del suelo

En la tabla 19, se muestra los resultados de grado de compactación haciendo uso del densímetro nuclear y módulo resiliente haciendo uso de un equipo LWD para una carga de aplicación de 7KN.

Tabla 19:
Deflexión máxima – capa granular

CALCULOS								
Punto No.	DENSIMETRO NUCLEAR	LWD		Parámetro de bondad de ajuste (MÓDULO DINAMICO DE DEFORMACIÓN Vs. DEFLEXIÓN)				
	% de Compactación	Modulo de resiliencia/ Modulo dinamico de deformación (Mpa)	DEFLEXIÓN MAX (mm.)	S _y	S _e	S _e /S _y	CRITERIO R ²	R ²
1	100.90%	163.87 MPa	15.76 mm	18.828	0.009	0.0005	No cumple	0.704
3	98.50%	138.79 MPa	18.21 mm					
4	102.85%	189.26 MPa	11.50 mm					
5	98.30%	156.25 MPa	18.14 mm					
6	99.60%	173.20 MPa	16.99 mm					

Parámetro de bondad de ajuste		
CRITERIO	R2	Se/Sy
Excelente	Superior a 0,90	Más bajo que 0,350
Bueno	Entre 0,70 a 0,89	Entre 0,36 y 0,55
Regular	Entre 0,40 y 0,69	Entre 0,56 y 0,75.
Pobre	Entre 0,20 a 0,39	Entre 0,76 y 0,90.
Muy pobre	Más bajo que 0,19	Entre 0,90 y 1,00.
Sin correlación	Valores imaginarios	Superior a 1,00

Fuente y Elaboración: Propia

En la gráfica 19, se muestra gráficamente la relación del grado de compactación con el módulo resiliente, obteniendo una R²= 0.73

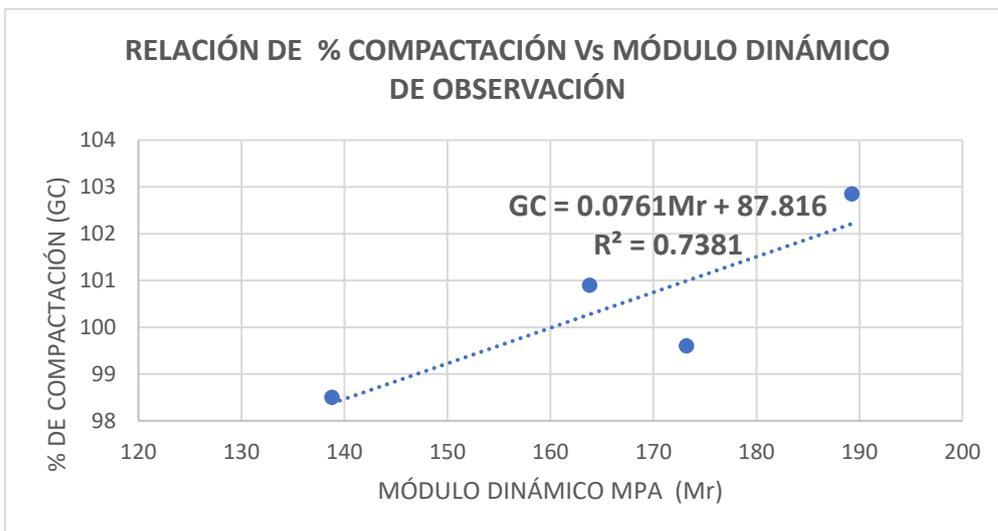


Figura 19: Relación de % de compactación vs módulo dinámico de deformación.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados

4.1.1 Metodología de relación de prospección

En la figura 17, se muestra los resultados del comportamiento de la ecuación de la recta en función de las deflexiones TP-BF-STB con la deflexión LWD.

$$d_{LWD} = 0.9173d_{TP} + 1.5609$$

$$R^2 = 0.8176$$

4.1.2 Metodología de relación de densificación del suelo

En la figura 18, se muestra los resultados del comportamiento de la ecuación de la recta en función del, grado de compactación con la deflexión

$$GC = -0.0061d + 1.0957$$

$$R^2 = 0.836$$

$$Se/Sy = 0.405$$

4.1.3 Metodología de relación de resistencia del suelo

En la figura 19, se muestra los resultados del comportamiento de la ecuación de la recta en función del, grado de compactación con el módulo dinámico.

$$GC = 0.0761Mr + 87.816$$

$$R^2 = 0.7381$$

$$Se/Sy = 0.405$$

4.2 Análisis de resultados

4.2.1 Metodología de prospección

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hipótesis específica 01

Contrastación de hipótesis – Prueba T-Student

Paso 01: Descripción de la hipótesis específica 01

“Una metodología de relación de prospección recolecta datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible”.

Se presenta las hipótesis estadísticas:

H0 = Recolecta satisfactoriamente datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible

H1 = No determina satisfactoriamente datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible

$$H0 : U1 - U2 > 81.00\%$$

$$H1 : U1 - U2 < 81.00 \%$$

Donde:

U1= Valor de deflexión LWD

U2= Valor de la deflexión TP

Paso 02: Se designa el nivel de significancia

$$\alpha = 0.81$$

Paso 03: Cálculo de valores crítico y de prueba

En la tabla 20, se muestra el cálculo de los valores crítico (tc) y de prueba (tp) – T-Student, para tamaños de muestras pequeños ($n_i < 30$). El valor crítico (tc) está en función del grado de libertad y confiabilidad.

Tabla 20:

Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 01

	Tipo de contrastación de la Hipótesis : Mayor que	
	Muestra U1	Muestra U2
	15.76	16.5
	14.55	16.85
	18.21	18.3
	11.5	11
	18.14	17.5
	16.99	16.5
Media	15.86	16.11
Desviación Estándar	2.56	2.60
Tamaño de Muestra	6	6
Valor Tabular: Dist.Normal		1.64
Valor Tabular: Dist. T Student (tc)		1.81
Estadístico de Prueba (tp)		0.168

Elaboración: Propia

Paso 04: Decisión y conclusión

Decisión:

Para el tipo de contrastación de la hipótesis “mayor que”, se puede ver que el valor estadístico de prueba (tp) es $0.168 <$ al valor crítico (tc) 1.81, por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Conclusión:

Se determina satisfactoriamente la recolección de datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible consiguiendo el parámetro de bondad de ajuste $R^2=0.81$.

ANALISIS DE RESULTADOS

Al usar una metodología de relación de prospección se obtiene datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible similares a la norma TP BF-STB Prueba dinámica de carga de placa con el comprobador de caída de peso ligero.

4.2.2 Relación de densificación del suelo

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hipótesis específica 02

Contrastación de hipótesis – Prueba T-Student

Paso 01: Descripción de la hipótesis específica 02

“Una metodología de relación de densificación del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible”.

Se presenta las hipótesis estadísticas:

H_0 = Determina satisfactoriamente el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

H_1 = No determina satisfactoriamente el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

$H_0 : U_1 - U_2 = > 83.00\%$ (parámetro de bondad de ajuste R^2)

H1 : $U1 - U2 < 83.00\%$ (parámetro de bondad de ajuste R^2)

Donde:

U1= Valor del porcentaje del grado de compactación

U2= Valor de la deflexión

Paso 02: Se designa el nivel de significancia

$\alpha = 0.83$

Paso 03: Cálculo de valores crítico y de prueba

En la tabla 21, se muestra el cálculo de los valores crítico (t_c) y de prueba (t_p) – T-Student, para tamaños de muestras pequeños ($n_i < 30$). El valor crítico (t_c) está en función del grado de libertad y confiabilidad

Tabla 21:

Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 02

		Tipo de contrastación de la Hipótesis : Mayor que	
		Muestra	Muestra
		U1 (%)	U2 (mm)
		100.9	15.76
		99.6	14.55
		98.5	18.21
		102.85	11.5
		98.3	18.14
		99.6	16.99
Media		99.96	15.86
Desviación Estándar		1.70	2.56
Tamaño de Muestra		6	6
Valor Tabular: Dist.Normal		0.95	
Valor Tabular: Dist. T Student (t_c)		1.00	
Estadístico	de Prueba (t_p)	-67.10	

Elaboración: Propia

Paso 04: Decisión y conclusión

Decisión:

Para el tipo de contrastación de la hipótesis “mayor que”, se puede ver que el valor estadístico de prueba (t_p) es $-67.10 <$ al valor crítico (t_c) 1.00 , por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Conclusión:

Se determina satisfactoriamente evaluar la compactación en capas granulares en un pavimento flexible consiguiendo el parámetro de bondad de ajuste $R^2 = 0.83$.

ANALISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos mediante la metodología de relación entre el grado de compactación y deflexión en capas granulares de un pavimento flexible se observa que a menores deflexiones se consiguen mayores porcentajes de grado de compactación.

De los resultados obtenidos mediante la metodología de relación entre el grado de compactación y deflexión en capas granulares de un pavimento flexible se observa que a mayores deflexiones se consiguen menores porcentajes de grado de compactación.

4.2.3 Relación de resistencia del suelo

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hipótesis específica 03

Contrastación de hipótesis – Prueba T-Student

Paso 01: Descripción de la hipótesis específica 03

“Una metodología de relación de resistencia del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible”.

Se presenta las hipótesis estadísticas:

H0 = Determina satisfactoriamente el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

H1 = No determina satisfactoriamente el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.

H0 : $U1 - U2 > 73.00\%$

H1 : $U1 - U2 < 73.00 \%$

Donde:

U1= Valor del porcentaje del grado de compactación

U2= Valor del módulo dinámico

Paso 02: Se designa el nivel de significancia

$\alpha = 0.73$

Paso 03: Cálculo de valores crítico y de prueba

En la tabla 22, se muestra el cálculo de los valores crítico (tc) y de prueba (tp) – T-Student, para tamaños de muestras pequeños ($n_i < 30$). El valor critico (tc) está en función del grado de libertad y confiabilidad

Tabla 22:

Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 03

	Tipo de contrastación de la Hipótesis : Mayor que	
	Muestra U1	Muestra U2
	100.9	163.8
	98.5	138.79
	102.85	189.26
	99.6	173.2
Media	100.46	166.26
Desviación Estándar	1.87	21.12
Tamaño de Muestra	4	4
Valor Tabular: Dist.Normal		-0.47
Valor Tabular: Dist. T Student (tc)		-0.49
Estadístico de Prueba (tp)		-6.20

Elaboración: Propia

Paso 04: Decisión y conclusión

Decisión:

Para el tipo de contrastación de la hipótesis “mayor que”, se puede ver que el valor estadístico de prueba (tp) es $-6.20 <$ al valor crítico (tc) -0.49 , por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Conclusión:

Se determina satisfactoriamente el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible consiguiendo el parámetro de bondad de ajuste $R^2 = 0.73$ siendo un resultado bueno.

ANALISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos mediante la metodología de relación entre el grado de compactación y modulo dinámico de deformación en capas granulares de un pavimento flexible se observa que a mayores módulos dinámicos de deformación se consiguen mayores porcentajes de grado de compactación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- a. La metodología de relación de prospección recolecta datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible consiguiendo el parámetro de bondad de ajuste $R^2 = 0.81$ siendo un resultado bueno según la tabla 12.

- b. La metodología de relación de densificación del suelo permite evaluar la compactación en capas granulares en un pavimento flexible consiguiendo el parámetro de bondad de ajuste $R^2 = 0.83$ siendo un resultado bueno según la tabla 12.

- c. La metodología de relación de resistencia del suelo evalúa la compactación en capas granulares en un pavimento flexible consiguiendo el parámetro de bondad de ajuste $R^2 = 0.73$ siendo un resultado bueno según la tabla 12.

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- a. Utilizar la metodología de relación de prospección para recolectar datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible.
- b. Manejar esta metodología de relación de densificación del suelo con el fin de evaluar la compactación en diferentes capas granulares de un pavimento flexible.
- c. Usar esta metodología de relación de resistencia del suelo con el fin de evaluar la compactación en diferentes capas granulares de un pavimento flexible.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). Obtenido de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D6433-07.htm>
- Angelone, s., & Martinez, F. (2000). *Analysis of non-linear models describing the resilient behaviour for soils and unbound materials, Unbound Aggregates in Road Construction*. Dawson Balkema,. Rotterdam,: Unbound Aggregates in Road Construction.
- Asociación de investigación de Carreteras y Transporte. (2018). *Prueba dinámica de carga de placa con el comprobador de caída de peso ligero*. Normas de ensayos técnicos para suelo y roca en la construcción de carreteras TP BF-StB, Part B 8.3
- Berrocal e., c. N. (2019). Comparación del control de grado de compactación in situ, utilizando el deflectómetro de peso liviano (lwd) comparado a los resultados del método nuclear y método del cono de arena para un tramo del proyecto tocache - juanjuí, en la región san martín. Tesis , *Universidad Continental, Junin* (2018).
- Fleming P. R, L. J. (2006). In-Situ Assessment of Stiffness Modulus for Highway Foundations during Construction. *Loughborough University, Department of Civil and Building Engineering & Nottingham Trent University, Division of Civil Engineering, The School of Property and Construction, Newton Building*.
- Fleming, e. (2001). Field Measurement of Stiffness Modulus for Pavement Foundations. *Annual Meeting of the Transportation Research Board(79th)*.
- Flores Cano, J. M. (2014). validación de la determinación de la densidad in situ, de un tramo de tramo del proyecto "collas-tababela", utilizando un densímetro eléctrico y comparando los resultados con el densímetro nuclear y el cono de arena. Disertación previa a la obtención al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Facultad de Ingeniería Escuela de Civil, 2014.

- Gamboa, G. A., & Beltrán, G. A. (2019). *Análisis técnico del deterioro del pavimento de las concesiones viales de Colombia conforme a los parámetros de evaluación establecidos en los contratos de concesión para la evaluación de modelos del comportamiento de los pavimentos*. Recuperado el 25 de 10 de 2020, de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/16470>
- García, O. C., Castellanos, M. F., Bacca, D. F., & Puerto, D. A. (2007). *Correlación de Resultados Entre el Ensayo Equivalente de Arena y Azul de Metileno (Método de la Mancha) en Materiales Granulares*. Recuperado el 25 de 10 de 2020, de <http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/viewfile/1966/1832>
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J., & Pérez Salazar, A. (2004). Módulos de resiliencia de agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas. *SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES*, 98.
- Garnica, Anguas, P. , & Martínez Peña, G. I. (2004). MÓDULOS DE RESILIENCIA DE AGREGADOS PROVENIENTES DE ROCAS ALTAMENTE INTEMPERIZADAS. *SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE*(257), 77.
- Garnica, Amguas. P., Garcia, N. P., & Lopez, J. A. (2000). *MODULOS DE RESILENCIA EN SUELOS FINOS Y MATERIALES GRANULARES*. Recuperado el 25 de 10 de 2020, de <https://trid.trb.org/view/950373>
- Gil O, G. (2011). “*Comparación entre densímetro nuclear y eléctrico*. Tesis, Universidad Rafael Urdaneta.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (12 de 09 de 2014). *Metodología de la investigación* (Quinta ed.). (M. G. S.A., Ed.) Mexico, Mexico: Mcgraw Hill.
- Horacio Saldaño, O. (s.f.). *Metodología de la investigación*. doi:<http://imagenes.mailxmail.com/cursos/pdf/6/tesis-grado-metodologia-investigacion-23736.pd>

- Jiménez, M. (2019). *COMPARACIÓN EN CAMPO CON DEFLECTÓMETRO LIVIANO EN LA EVALUACIÓN DE RIGIDEZ IN SITU USADO EN EL CONTROL DE COMPACTACION*. I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos III Congreso Regional IPMA-LATNET, Lima.
- Llosa Grau, J. (22 de 10 de 2020). *Propuesta alternativa para la distribución racional del presupuesto anual municipal para el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos (aplicación: Municipio de La Molina)*. nfo:eu-repo/semantics/bachelorThesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/273573>
- Lorenzini, M. S., & Arcos, S. V. (2006). Correlación entre Densímetro Nuclear y Cono de Arena para Suelos Finos de Baja Plasticidad y no Cohesivos. *Revista De La Construccion*, 5(2), 23-32. Recuperado el 25 de 10 de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4259950>
- Marradi, A. (2011). Dynamic Field Assessment of short term bearing capacity for cold. *I2*(1464-8164).
- Miranda Rebolledo, R. J. (2010). *Deterioro en Pavimentos Flexibles y Rigidos*. Tesis Para Obtener el Título de: Ingeniero Constructor, Universidad Austral de Chile, Valdivia - Chile.
- Ministerio de Transportes y comunicaciones. (09 de Abril de 2014). Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. *Dirección General de Caminos y Ferrocarriles*, 305. Lima, Lima, Perú. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2. (03 de Junio de 2016). Manual de ensayos de Materiales. *RD N° 18-2016-MTC/14*, 1273. Lima, Lima, Perú. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html

- Ministerio de Transportes y comunicaciones. -E-117. (s.f.). MTC E 124 Densidad en el sitio – método nuclear a profundidad reducida. Perú.
- Ministerio de Transportes y comunicaciones. -E-124. (s.f.). Manual de Carreteras: Ensayo de Materiales. *MTC E 124 Densidad en el sitio – método nuclear a profundidad reducida*. Peru.
- MUSHARRAF, E., & ZAMAN, A. (1994). Resilient Moduli of Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering*. 120(6), 967-988.
- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la Investigación*. Colombia: Ediciones de la U.
- Ortiz, J. E. (2011). *Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa*. Recuperado el 25 de 10 de 2020, de <http://redalyc.org/pdf/2913/291323470007.pdf>
- Osorio Lird, A. (2008). *metodología de evaluación in-situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el deflectómetro de impact*.
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., Nute Vargas, H., & Gudiño Espino, M. (2012). *Evaluación del módulo de resiliencia, en trayectorias de humedecimiento y secado*. Sanfandila.
- Pérez Pérez, I. (2020). *PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS CAPAS DE BASE Y SUBBASE CONSTRUIDAS CON MATERIALES GRANULARES EN LOS FIRMES DE CARRETERAS*. Universidade da Coruña. E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Informe técnico, A Coruña. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/80522567.pdf>
- Quiñones Paucar, K. (2017). *DIAGNÓSTICO Y DISEÑO VIAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE: AVENIDA ALFONSO UGARTE (TRAMO: CARRETERA CENTRAL – AVENIDA FERROCARRIL), EN EL DISTRITO DE HUALHUAS, PROVINCIA*

DE HUANCAYO 2016. Tesis, UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES, Huancayo.

Rodriguez Moguel, E. A. (2005). *La Creatividad, rigor del estudio y la integridad son factores que transforman al estudiante en un profesionalista de exito* (Quinta ed.). Villa Hermosa, Mexico. Recuperado el 2020

Salamanca Rodríguez, E. (2020). *CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DE COMPACTACIÓN USANDO EL EQUIPO LWD EN CAPAS GRANULARES EN UN PROYECTO DE INFRAESTRUCTURA VIAL*. Trabajo de Grado, Para obtener el Título Magister en Ingeniería Civil., Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Bogotá, Colombia.

Seed, H. C. (1955). Effect of repeated loading on the strength. *Proc, Highway Research Record*, 34(541-558).

Seed, H., Chan, C., & Lee, C. (1962). Resilience Characteristics of Subgrade Soils and. Zaman Musharraf, e. (1993). Resilient Moduli of Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering.*, 120(6).

ANEXOS

Anexo 01: Declaración de Autenticidad

	Universidad Ricardo Palma	Escuela de Posgrado
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y NO PLAGIO		
DECLARACIÓN DEL GRADUANDO		
Por el presente, el graduando: <i>(Apellidos y nombres)</i>		
Matías Santos Roberto Mario		
en condición de egresado del Programa de Posgrado:		
Ingeniería Vial		
deja constancia que ha elaborado la tesis intitulada:		
Metodología de relación para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible		
<p>Declara que el presente trabajo de tesis ha sido elaborado por el mismo y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica, de investigación, profesional o similar.</p> <p>Deja constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no ha asumido como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de la Internet.</p> <p>Asimismo, ratifica que es plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asume la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento y es consciente de las connotaciones éticas y legales involucradas.</p> <p>En caso de incumplimiento de esta declaración, el graduando se somete a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y los dispositivos legales vigentes.</p>		
_____ Firma del graduando		_____ Fecha

Anexo 02: Autorización de consentimiento para realizar la investigación

 Universidad Ricardo Palma		Escuela de Posgrado			
AUTORIZACIÓN PARA REALIZAR LA INVESTIGACIÓN					
DECLARACIÓN DEL RESPONSABLE DEL AREA O DEPENDENCIA DONDE SE REALIZARA LA INVESTIGACIÓN					
<p>Dejo constancia que el área o dependencia que dirijo, ha tomado conocimiento del proyecto de tesis titulado:</p>					
Metodología de relación para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible					
<p>el mismo que es realizado por el Sr./Srta. Estudiante (Apellidos y nombres):</p>					
Matías Santos Roberto Mario					
<p>, en condición de estudiante - investigador del Programa de:</p>					
Ingeniería Vial					
<p>Así mismo señalamos, que según nuestra normativa interna procederemos con el apoyo al desarrollo del proyecto de investigación, dando las facilidades del caso para aplicación de los instrumentos de recolección de datos.</p>					
<p>En razón de lo expresado doy mi consentimiento para el uso de la información y/o la aplicación de los instrumentos de recolección de datos:</p>					
Nombre de la empresa: MULTISERVIS MECHITA E.I.R.L		Autorización para el uso del nombre de la Empresa en el Informe Final	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">SI</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NO</td> </tr> </table>	SI	NO
SI					
NO					
Apellidos y Nombres del Jefe/Responsable del área: Sra. Carol Santos Mayta		Cargo del Jefe/Responsable del área: Area de Operaciones			
Teléfono fijo (incluyendo anexo) y/o celular: 977129598		Correo electrónico de la empresa: c.santos@mulmec.com			
_____ Firma		_____ Fecha			

Anexo 03: Matriz de consistencia

En la tabla 23, se muestra la matriz de consistencia del trabajo de tesis “metodología de relación para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible”

Tabla23:
Matriz de Consistencia

Problemas Principal	Objetivos General	Hipótesis General	Variables Independiente	Indicador V.I.	Variables Dependiente	Indicador V.D.
¿De qué manera una metodología de relación evalúa la compactación en capas granulares de un pavimento flexible?	Proponer una metodología de relación a fin de evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible a través de datos de campo usando un equipo LWD.	Una metodología de relación evalúa la compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	metodología de relación	Características del suelo y cargas actuantes	Capas granulares de un pavimento flexible	Densidad, Deflexión y módulo resiliente

Problemas Especifico	Objetivos Específicos	Hipótesis Especificas	Variables Independiente	Indicador V.I.	Variables Dependiente	Indicador V.D.
¿De qué manera una metodología de relación de prospección influye en recolectar datos de soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible?	Determinar una metodología de relación de prospección para recolectar datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible.	Una metodología de relación de prospección recolecta datos del soporte estructural en capas granulares de un pavimento flexible.	Metodología de relación de prospección	Características del suelo y cargas actuantes	Datos del soporte estructural en capas granulares	Deflexión y módulos resilientes
¿De qué manera una metodología de relación de densificación del suelo influye en un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible?	Determinar una metodología de relación de densificación del suelo con el fin de obtener un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	Una metodología de relación de densificación del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	Metodología de relación de densificación del suelo	Características del suelo y cargas actuantes	Grado de compactación en capas granulares	Deflexión de campo y grado de compactación
¿De qué manera una de relación de densidad y modulo dinámico de deformación influye en un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible?	Determinar una metodología de relación de resistencia del suelo con el fin de obtener un grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	Una metodología de relación de resistencia del suelo determina el grado de compactación en capas granulares de un pavimento flexible.	Metodología de relación de resistencia del suelo	Características del suelo y cargas actuantes	Grado de compactación en capas granulares	Módulos resilientes y grado de compactación

Fuente y Elaboración: propia

Anexo 04: Matriz de Operacionalización

En la tabla 24, se muestra la matriz de operabilidad del trabajo de tesis “metodología de relación para evaluar la compactación en capas granulares de un pavimento flexible”

Tabla24:
Matriz de operacionalización

Variable Independiente	Indicador	Definición Conceptual	Dimensiones	Instrumento
Metodología de relación	Características del suelo y cargas actuantes	El método es el modelo de trabajo o secuencia lógica que orienta una investigación y se entiende por relación la conexión de una cosa con otra.	Metodología de relación de prospección Metodología de relación de densificación del suelo Metodología de relación de resistencia del suelo	Light weight deflectometer y Densímetro nuclear
Variable Dependiente	Indicador	Definición Conceptual	Dimensiones	Instrumento
Capas granulares de un pavimento flexible	Compactación, deflexión y módulo resiliente	Es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito.	Base granular.	Light weight deflectometer y densímetro nuclear

Fuente y Elaboración: Propia

Anexo 05: Protocolos o Instrumentos utilizados

En la figura 20, se muestran los instrumentos utilizados para esta investigación.

Instrumentos utilizados	Imagen de instrumentos utilizados
Dendimetro nuclear (DM)	
Light Falling Weight Deflectometer (LWD)	

Figura 20: Instrumentos utilizados.

Fuente: Propia.

Anexo 06: Formato de instrumentos o protocolos utilizados

Formato de Protocolo para recolección de datos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer

DATOS DE LA MUESTRA				
CALICATA : C-001		PROGRESIVA : KM 00-000		
MUESTRA : M-001		CLASF. (SUCS) :		
PROF. (m) : 0.00 - 0.20		CLASF. (AASHTO) :		
METODO DE COMPACTACION :		FECHA DE ENSAYO :		
FABRICANTE:		FECHA DE LA ÚLTIMA CALIBRACIÓN :		
NUMERO DE SERIE :		FECHA DE LA ÚLTIMA CALIBRACIÓN :		
ALTURA DE CAÍDA SEGÚN LA ETIQUETA DE CALI		0.00 m	HORA :	
CLIMA :		TEMPERATU 25.0 °C	ALTITUD: 0.00 msnm	ZONA:
% DE COMPACTACIÓN : 100.03%		HUMEDAD PROMEDIO DE MUESTRA 6.00%		
PUNTO DE PRUEBA	MEDICIÓN DE IMPACTO N°	V _{max} [mm/s]	S _{max} () [mm]	Fza. MAX de Impacto (KN)
1	3 IMPACTOS DE CARGA			
	1	V _{max 1} = 18.30	S _{max 1} = 16.53	7.28
	2	V _{max 2} = 16.85	S _{max 2} = 15.63	7.25
	3	V _{max 3} = 16.50	S _{max 3} = 15.14	7.25
	Valor promedio	V _{max} = 17.22 mm	S _{max} = 15.76 mm	F (KN) 7.26
	$t_v \text{ [ms]} = \frac{S_{max} \text{ [mm]}}{V_{max} \text{ [mm/s]}} \cdot 1000 =$		t _v (ms) = 915.51 ms	
$E_{vd,L} \text{ [MN/m}^2\text{]} = \frac{22.5}{S_{max} \text{ [mm]}} =$		E _{vd,L} = 1.5 (MN/m ²) 1.50 MPa		

Anexo 07: Tablas de confiabilidad y validez

En la tabla 25, se muestra la confiabilidad y validez de los instrumentos a utilizar.

Tabla 25:
Confiabilidad y validez

Recolección de datos	Instrumentos para utilizar	Norma de ensayo y/o teorías
Deflexión de campo	Light Falling Weight Deflectometer (LWD)	ASTM E - 2583
Densidad	Densimetro nuclear (DM)	ASTM D - 2922

Fuente y Elaboración: Propia