

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 con
mención en Carreteras, Puentes y Túneles

**Modelos de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de
suelos de un pavimento flexible**

Autor: Bach. Pérez Pacori, Granvil Riter

Asesor: Dr. Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria

A mi padre Ing. Guillermo Eloy Pérez Ticoná y a mi madre Josefa Pacori de Pérez, por llevarme a la comunión con Dios.

A mi familia recién formada.

Agradecimiento

A Dios, por direccionar un camino de mi vida a las obras viales, poniendo a personas con las que aprendí sobre este rubro.

Al Ing. Mg. Jonathan Steve Vera Silva, a quien considero como mi mentor en la ingeniería vial.

A la concesionaria donde laboro.

Al Doctor Andrés Avelino Valencia Gutiérrez, por su orientación y guía para la realización de esta tesis.

Índice de contenido

RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Descripción del Problema.....	2
1.2 Formulación del Problema.....	6
1.2.1 Problema General.....	6
1.2.2 Problemas específicos	6
1.3 Importancia y Justificación del Estudio.....	7
1.4 Delimitación del Estudio	11
1.5 Objetivos de la investigación.....	13
1.5.1 Objetivo general	13
1.5.2 Objetivos específicos.....	13
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Marco Histórico.....	14
2.2 Investigaciones Relacionadas con el Tema	21
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio.....	30
2.4 Definición de términos básicos.....	40
2.5 Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis	42
2.6 Hipótesis	43
2.6.1 Hipótesis general.....	43
2.6.2 Hipótesis Específicas.....	43
2.7 Variables.....	44
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	45
3.1 Tipo, Método y diseño de la Investigación.....	45
3.2 Población y muestra.....	46

3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	46
3.4 Descripción de procedimientos de análisis.....	48
3.4.1 Trabajos de gabinete previo a la construcción de un pavimento flexible	48
3.4.2 Trabajos durante la construcción de un pavimento flexible.....	61
3.4.3 Procesamiento de datos y cálculos en gabinete.....	63
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	83
4.1 Resultados.....	83
4.1.1 Modelo de análisis mecánico del suelo	83
4.1.2 Modelo matemático de deformación del suelo	86
4.1.3 Modelo matemático de resistencia del suelo.....	89
4.2 Análisis de resultados	93
4.2.1 Modelo de análisis mecánico del suelo	93
4.2.2 Modelo matemático de deformación del suelo	93
4.2.3 Modelo matemático de resistencia del suelo.....	94
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS.....	97
ANEXOS	103

Listado de tablas

Tabla 01:	Leyes de comportamiento de deflexión admisible de un modelo estructural de pavimento flexible.	16
Tabla 02:	Resumen de los resultados realizados con LWD.....	24
Tabla 03:	Resumen de los resultados de las tensiones verticales	24
Tabla 04:	Resumen de los resultados realizados con LWD.....	25
Tabla 05:	Resumen de los resultados de las tensiones verticales	25
Tabla 06:	Resultados de los ensayos LWD	27
Tabla 07:	Requerimientos granulométricos para subbase granular – gradación B....	32
Tabla 08:	Requerimientos de agregados para subbase granular	32
Tabla 09:	Requerimientos granulométricos para base granular – gradación B	33
Tabla 10:	Requerimientos de agregados gruesos para base granular	33
Tabla 11:	Requerimientos de agregados finos para base granular.....	33
Tabla 12:	Requerimientos de agregados para base granular.....	34
Tabla13:	Acción de la Viga Benkelman en el desarrollo de las diversas actividades de la ingeniería de los pavimentos.....	40
Tabla 14:	Variable independiente y variable dependiente de la hipótesis general	44
Tabla15:	Variable independiente y variable dependiente de cada hipótesis específica	44
Tabla 16:	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	46
Tabla 17:	Matriz de análisis de datos	47
Tabla 18:	Características de los 04 tipos de estructuras de pavimentos	48
Tabla 19:	Modelos de análisis mecánico del suelo en cada capa estructural de 04 tipos de estructuras de pavimentos	57
Tabla 20:	Variación en porcentaje de las deflexiones calculadas ($x 10^{-2}$ mm) entre modelo de análisis mecánico del suelo y programa Pitrapave.	58
Tabla 21:	Medición de relación de variables – pavimento tipo 03.....	58
Tabla 22:	Medición de relación de variables – pavimento tipo 06.....	59
Tabla 23:	Medición de relación de variables – pavimento tipo 13.....	59
Tabla 24:	Medición de relación de variables – pavimento tipo 29.....	60
Tabla 25:	Resultados de deflexión.....	66
Tabla 26:	Ecuación cuadrática promedio de 06 muestras representativas.....	67
Tabla 27:	Factor por unidad de carga para 41 KN.....	68

Tabla 28:	Constantes k y k_1 en un modelo matemático de deformación del suelo para diferentes tipos de pavimentos.....	70
Tabla 29:	Variación en porcentaje de deflexiones en capa subbase del pavimento tipo 06.....	71
Tabla 30:	Medición de relación de variables en capa subbase del pavimento tipo 06 - deflexión.....	72
Tabla 31:	Resultados de módulos resilientes.....	74
Tabla 32:	Ecuación exponencial promedio de las 06 muestras representativas	76
Tabla 33:	Factor por unidad de carga para 41 KN – módulo resiliente.....	77
Tabla 34:	Constantes k y k_1 en un modelo matemático de resistencia del suelo para diferentes tipos de pavimentos.	79
Tabla 35:	Diferencia de módulos resilientes en capa subbase del pavimento tipo 06	79
Tabla 36:	Variación en porcentaje del módulo resiliente en Mpa entre un modelo matemático de resistencia del suelo y CBR del material de campo	80
Tabla 37:	Medición de relación de variables en capa subbase del pavimento tipo 06 –Módulo resiliente.....	81
Tabla 38:	Deflexiones calculadas ($\times 10^{-2}$ mm).....	83
Tabla 39:	Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 01	84
Tabla 40:	Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 02	88
Tabla 41:	Cálculo de valores crítico y de prueba – T Student, hipótesis específica 03	91
Tabla 42:	Matriz de Consistencia	105
Tabla 43:	Matriz de operacionalización.....	107
Tabla 44:	Confiableidad y validez.....	110

Listado de figuras

Figura 01:	Obra IVD el Derby, ubicación de los 04 tipos de estructura del pavimento	12
Figura 02:	Equipo para realización del ensayo de deflexión –Dynalect.....	17
Figura 03:	Deflectómetro de impacto Dynatest FWD 800	18
Figura 04:	Equipo Light Falling Weight Deflectometer - PRIMA 100.....	19
Figura 05:	Deflectograma – LWD y Viga Benkelman	22
Figura 06:	Gráfico con las curvas de deflexión del tramo 1–Viga Benkelman y LWD	23
Figura 07:	Gráfico con las curvas de deflexión del tramo2 – LWD y Viga Benkelman	26
Figura 08:	Acumulación de la deformación con el número de ciclos.....	36
Figura 09:	Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis	43
Figura 10:	Esquema del tipo de diseño cuasi experimental	45
Figura 11:	Equipos Light Falling Weight Deflectometer (LWD) y Viga Benkelman (VB) de brazo simple para recolección de datos de deflexión y módulos resilientes	47
Figura 12:	Mapa conceptual de un modelo de análisis mecánico del suelo.....	50
Figura 13:	Fase 1.1 Subrasante	51
Figura 14:	Fase 2.1 Subbase	51
Figura 15:	Fase 3.1 Base	51
Figura 16:	Fase 4.1 Carpeta asfáltica	52
Figura 17:	Grafico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 03	53
Figura 18:	Grafico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 03	53
Figura 19:	Grafico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 06	54
Figura 20:	Grafico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 06	54
Figura 21:	Grafico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 13	55

Figura 22:	Grafico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 06	55
Figura 23:	Grafico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 29	56
Figura 24:	Grafico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 06	56
Figura 25:	Obra IVD el Derby, Extracción de muestras para realización de ensayos.	61
Figura 26:	Ensayos en campo con el equipo Viga Benkelman en una capa conformada.	62
Figura 27:	Ensayo en campo con el equipo Light Falling Weight Deflectometer en una capa conformada.	62
Figura 28:	Ensayos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer a diferentes aplicaciones de carga en una capa conformada.	63
Figura 29:	Formato de exportación de datos de deflexión y módulos resiliente.	64
Figura 30:	Ecuación cuadrática para 01 punto de ensayo en la capa subbase del pavimento tipo 06.	65
Figura 31:	Identificación de muestras representativas de deflexión.	67
Figura 32:	Ecuación cuadrática general.	68
Figura 33:	Representación gráfica del Factor F.	69
Figura 34:	Ecuación exponencial para 01 punto de ensayo en la capa subbase del pavimento tipo 06.	74
Figura 35:	Identificación de muestras representativa de módulos resilientes.	75
Figura 36:	Ecuación exponencial general para obtener módulos resilientes.	76
Figura 37:	Factor de carga – módulo resiliente.	78
Figura 38:	Deflectograma de la capa subbase del pavimento tipo 06.	86
Figura 39:	Diagrama de resultados de módulos resilientes.	90
Figura 40:	Instrumentos utilizados.	108

RESUMEN

Esta investigación es de enfoque cuantitativo, que surge ante el problema causado por el deterioro de un pavimento, como huecos, ahuellamientos, hundimientos y falta de capacidad de soporte estructural, trazándose como objetivo determinar modelos de ajuste de carga a fin de evaluar, estructuralmente, las capas de suelos de un pavimento flexible, a través de una representación gráfica 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 del diseño estructural del pavimento y programa computacional Pitrapave, obteniendo, un modelo de análisis mecánico del suelo, que determina la deflexión admisible de las capas de suelos de 04 tipos de pavimentos flexibles. Al término de la conformación de estas capas de suelos mencionados, se realizó ensayos con un equipo liviano portátil denominado Light Falling Weight Deflectometer, el cual, con la data proporcionada, se determinó un modelo matemático de deformación del suelo que, determina la deflexión a una proyección de carga de 41 KN, estos resultados se compararon con los resultados patrones, obtenidos mediante ensayos realizados con el equipo Viga Benkelman. De igual manera, con los datos de ensayo proporcionados por el equipo Light Falling Weight Deflectometer, se determinó otro modelo matemático de resistencia del suelo, obteniendo como resultado promedio, el módulo resiliente de cada capa estructural, este resultado se comparó con los resultados de módulos resilientes adoptados en el diseño y el material conformado. Concluyendo que, los modelos de ajuste de carga, y los modelos matemáticos obtienen resultados con aproximaciones al +/- 7.50%.

Palabras clave: Modelo matemático, deflexión, resiliencia.

ABSTRACT

This research is of a quantitative approach, which arises from the problem caused by the deterioration of a pavement, such as hollowings, sinking and lack of structural support capacity, with the aim of determining load adjustment models in order to evaluate, structurally, the soil layers of a flexible pavement, through a graphical representation obtained with field data. To solve this, prior to the execution of structural layers of soils on a flexible pavement, the study of the structural design of the pavement and Pitrapave computational program was used, obtaining, a model of mechanical analysis of the soil, which determines the permissible deflection of the soil layers of 04 types of flexible pavements. At the end of the formation of these soil layers mentioned above, tests were carried out on a portable light equipment called Light Falling Weight Deflectometer, which, with the data provided, a mathematical model of soil deformation was determined which, determines the deflection to a load projection of 41 KN, these results were compared with the standard results, obtained by tests carried out with the Benkelman Beam team. Similarly, with the test data provided by the Light Falling Weight Deflectometer team, another mathematical model of soil resistance was determined, obtaining as an average result, the resilient module of each structural layer, this result was compared with the results of resilient modules adopted in the design and the formed material. Concluding that, load adjustment models, and mathematical models get results with approximations to +/- 7.50%.

Keywords: Mathematical model, deflection, resilience.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que enfrenta la ingeniería vial, es el deterioro de los pavimentos, siendo una de las causas la falta de una evaluación estructural, al término de la conformación de cada capa del suelo de un pavimento flexible, debido a, no contar con el valor del parámetro de control de la deflexión admisible, no contar con un equipo portátil para la realización del ensayo de la deflexión en campo y módulos resilientes.

Por consecuencia, la presente investigación, consta de realizar unos modelos de ajuste de carga, para obtener valores de deflexión admisible, deflexión de campo y módulos resilientes, para evaluar 04 tipos de estructura de pavimentos flexibles a nivel de suelos, a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, utilizando un equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer, en la vía auxiliar Cristóbal de peralta, entre las progresivas Km.0+850 y Km. 1+970, de la obra intercambio vial a desnivel el Derby – San Borja Norte.

Previo a la realización del ensayo de deflexión en campo, se obtuvo la deflexión admisible, para cada capa estructural de un pavimento flexible, según sus características y cargas actuantes mediante un modelo de análisis mecánico del suelo.

Para obtener la deflexión de campo y modulo resiliente, se utilizó un equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer, la aplicación de carga máxima del equipo es de 9KN, sin embargo, la aplicación de carga normada es de 41 KN, es por ello que, conformada la capa de suelo de un pavimento flexible, se ensayó a diferentes aplicaciones de carga entre 2 KN a 9KN, obteniendo deflexiones y módulos resilientes, con estos datos se trabajó en gabinete para proyectar a la carga normada, mediante un modelo matemático de deformación del suelo para obtener la deflexión de campo y un modelo matemático de resistencia del suelo para obtener el módulo resiliente. Cabe indicar que, también se recolecto datos de campo, con un equipo de Viga Benkelman de brazo simple, posteriormente se calculó su deflexión, siendo esta un valor patrón para su comparación. Para el módulo resiliente, se comparó, con los valores del módulo resiliente adoptado en el diseño del pavimento y del material utilizado en obra a través del ensayo CBR.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema

Uno de los principales problemas que enfrenta la ingeniería vial en el país, es el deterioro acelerado de los pavimentos. Este problema, se evidencia en varios lugares del Perú, así como lo indican los siguientes investigadores:

Sotil (2014), realizó un artículo denominado “estado de arte de la ingeniería de pavimentos”, textualmente indica que “continuamente se observan carreteras rurales y/o calles urbanas que, poco tiempo después de haber sido inauguradas, presentan problemas (baches, grietas, hundimientos y otros daños). Esto se debe, entre otras causas a malos diseños, malos materiales, mala ejecución de obra, falta de control de calidad, mayor cantidad de tráfico y/o una combinación de los mismos” (p. 78).

Condorchoa (2019), realizó un tema de tesis denominado “Factor clima y su relación con el deterioro del pavimento en ICA año 2019”, textualmente indica que “en la ciudad de Ica los pavimentos se observan y evidencian que existen factores que afectan el buen desempeño durante su vida útil; ello ocasiona inconvenientes en cuanto al cumplimiento del buen servicio en el tiempo para que fue diseñado” (p. 1).

Cardenas (2018), realizó un tema de tesis denominado “Influencia del tráfico vehicular con respecto a las deflexiones de los pavimentos flexibles en zona urbana de la ciudad de Huancayo, Junín – 2017”, textualmente indica que “el deterioro y desgaste prematuro de los pavimentos flexibles, es cada vez más, una condición frecuente que la población usuaria, tales como conductores, transportistas, viajeros, etc., tiene que afrontar, elevando costos de operación, mantenimiento, asimismo, incrementando el tiempo de transporte y el riesgo de accidentes vehiculares” (p. 24).

Por otra parte, existen modelos que fueron realizados por:

Ríos (2019), desarrollo modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, basado en las mediciones de IRI de los años 2010, 2012, 2015 y 2016 que permitió pronosticar los valores de IRI en corto, mediano y largo plazo.

Simón (2019), determino un modelo de gestión de conservación vial con la finalidad de optimizar los costos de mantenimiento.

Pero ninguno de estos modelos obtiene la deflexión admisible, deflexión de campo, módulo resiliente, para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible.

Por consiguiente, para realizar la evaluación estructural de un pavimento flexible, las especificaciones técnicas generales del MTC del Perú (2013), pág. 161, indica que, una vez terminado el tramo, el contratista debe presentar un documento técnico con la información de deflectometría y esta, debe ser aprobada en 24 horas hábiles por el supervisor, para proceder a colocar la capa estructural siguiente.

Frecuentemente, la presentación de este documento técnico de deflectometría tiene problemas, en su presentación, al terminar el tramo, debido a:

- Falta de equipos, para realizar el ensayo de deflexión de campo.
- Falta de datos de campo, por no realizar el ensayo de deflexión de campo.
- Falta del parámetro de control de la deflexión admisible.
- Falta de celeridad del procesamiento y realización del documento técnico.

Estos problemas provocan retrasos para la entrega del documento técnico, trayendo consigo, retrasos en la fecha de entrega de la obra y pérdidas económicas por equipos ociosos.

Sin embargo, existen herramientas, modelos, software, procedimientos y equipos que podrían contribuir a reducir estos problemas, por lo que es necesario crear unos modelos que determinen la deflexión admisible, la deflexión de campo y el módulo resiliente de campo y, mediante estos, realizar la evaluación estructural del suelo en cada capa conformada, con el fin de presentar el documento técnico en corto tiempo a la supervisión para su aprobación y proceder a colocar la capa estructural siguiente.

Todo lo mencionado sobre la evaluación estructural en cada capa del suelo, nos lleva a la siguiente pregunta general:

¿En qué manera unos modelos de ajuste de carga evalúan estructuralmente pavimentos en suelo?

Un problema, es la obtención del parámetro de control de la deflexión admisible, en capas del pavimento a nivel de suelos, por lo que, el manual de carreteras de suelos y pavimentos del MTC del Perú (2014), pág. 172, solo precisa los valores de deflexión admisible a nivel de carpeta de rodadura y, no a nivel de capas de suelos. Al no contar con valores de deflexión admisible, no se puede verificar y/o controlar en capas de suelos conformados que, las deflexiones de campo sean inferiores a las deflexiones admisibles.

A lo descrito en el párrafo anterior, es necesario conocer las deflexiones admisibles de cada capa del suelo de una estructura del pavimento, para ello, existen herramientas, modelos, software y procedimientos que podrían contribuir a reducir estos problemas, por lo que es necesario crear un modelo de análisis que, determine la deflexión admisible en las capas de suelos de diferentes estructuras de pavimentos, con el fin de tener el parámetro de control que, forma parte para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible.

Todo lo mencionado líneas arriba nos lleva a la siguiente pregunta:

¿De qué manera un modelo de análisis influye en la deflexión admisible de las capas de un pavimento flexible en suelos?

También ocurre un problema, con la obtención del valor de la deflexión de campo, debido a que la realización del ensayo, es mediante equipos pesados tal como indica Cárdenas (2018), que, en países de Norteamérica, Canadá, México y gran parte de Sudamérica como Colombia, Chile, Argentina, Brasil y Perú, son realizados con equipos deflectométricos como la Viga Benkelman, curvímetros, Deflectógrafo de Lacroix, incluso equipos de mayor precisión como son los deflectómetros de impacto (FWD).

Las especificaciones técnicas generales del MTC del Perú (2013), pág. 160, también considera el uso de equipos pesados, indicando que, una vez terminada la explanación se hará deflectometría, mediante el empleo de Viga Benkelman, FWD o cualquier equipo

de alta confiabilidad. Sin embargo, deja opciones, para el uso de algún equipo liviano de alta confiabilidad que podría reducir este problema.

Por otro lado, para realizar los ensayos de deflexión de campo, según las especificaciones técnicas generales del MTC del Perú (2013), en la pág. 161, especifica y describe los recursos para realizarlo a través del equipo Viga Benkelman, el cual depende de un camión, para la realización del ensayo. Por lo tanto, al requerir estos recursos, implica costo y tiempo para tener la disponibilidad de un camión en obra, que cumpla con las siguientes características: el eje trasero pesará en la balanza 8.2 toneladas, igualmente distribuidos en sus ruedas duales y estará equipado con llantas de caucho y cámaras neumáticas. Las llantas deberán ser 10" x 20", 12 lonas e infladas a 5.6 kg/cm² (80 libras por pulgada cuadrada). La distancia entre los puntos medios de la banda de rodamiento de ambas llantas de cada rueda dual debe ser de 32 cm.

Por lo descrito anteriormente, existe un equipo liviano respaldado por la ASTM E 2583, que permite obtener la deflexión de campo, en capas de suelos de un pavimento. Por consiguiente, este equipo liviano podría contribuir a reducir dichos problemas, sin embargo, como el equipo es liviano, la máxima aplicación de carga es de 9KN, siendo menor a lo requerido por la norma de 41 KN, por lo que es necesario proyectar la carga, mediante un modelo matemático del suelo con el fin de tener los resultados de deflexión de campo.

El resultado de la deflexión de campo, es necesario, ya que forma parte para la evaluación estructural de un pavimento a nivel de suelos.

Todo lo mencionado líneas arriba nos lleva a la siguiente pregunta:

¿De qué manera un modelo matemático del suelo influye en las deflexiones de campo?

También, hay dificultades en la obtención del valor del módulo resiliente mediante ensayos, debido a que los equipos para determinar el módulo resiliente son equipos pesados, de alto costo y que poseen instrumentaciones de alta tecnología, razón por la cual en nuestro medio se realizan poco de estos ensayos.

Usualmente, para obtener el módulo resiliente, se utilizan correlaciones empíricas que son determinados a partir de ensayos de California Bearing Ratio (CBR), apoyándose, según lo indicado en el cuadro 12.5, pág. 132, del manual de carreteras de suelos y pavimentos del MTC del Perú (2014).

Por consiguiente, un equipo liviano, podría ser parte de la solución del problema descrito en el párrafo anterior, sin embargo, como el equipo posee una máxima aplicación de carga de 9KN, menor a lo requerido por la norma de 41 KN. Es necesario realizar un ajuste de carga, mediante un modelo matemático de resistencia del suelo, con el fin de obtener los módulos resilientes de campo. Este resultado forma parte de la evaluación estructural del pavimento a nivel de suelos.

Todo lo mencionado líneas arriba nos lleva a la siguiente pregunta:

¿De qué manera un modelo matemático de resistencia del suelo influye en sus módulos resilientes de campo?

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿De qué manera un modelo de ajuste de carga evalúa estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿De qué manera un modelo de análisis mecánico del suelo influye en la deflexión admisible de las capas estructurales de un pavimento flexible?
- b. ¿De qué manera un modelo matemático de deformación del suelo influye en la deflexión de las capas de un pavimento flexible?
- c. ¿De qué manera un modelo matemático de resistencia del suelo influye en el módulo resiliente de las capas de un pavimento flexible?

1.3 Importancia y Justificación del Estudio

IMPORTANCIA

Esta investigación es importante porque proporciona modelos que ayuda a obtener, en forma rápida, las deflexiones y módulos resilientes.

son modelos de ajuste de carga que evalúa estructuralmente, capas de suelos de un pavimento flexible a través de una representación gráfica, obtenida con las datas de campo haciendo uso de un equipo liviano y portátil denominado Light Falling Weight Deflectometer.

Estos modelos proporcionan valores, con la que verifica y controla, el soporte estructural en las 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 un modelo de análisis mecánico del suelo, para obtener el valor de deflexión admisible a través de las características del suelo, espesores de capa y cargas actuantes. Siendo este valor, el parámetro de control que forma parte en la evaluación estructural.

El aporte de un modelo matemático de deformación del suelo, obtiene la deflexión en capas de suelos de un pavimento flexible durante su ejecución, esta es realizada a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, al realizar ensayos con el equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer.

Este modelo sirve para cada capa estructural, según su composición del tipo de estructura del pavimento flexible a nivel de suelos. Siendo relevante, ya que se verificará en corto tiempo y mínimos recursos, si la deflexión de campo se encuentra inferior a las deflexiones admisibles, con el fin de asegurar su capacidad de soporte de la capa estructural conformada llegando a mitigar fallas estructurales. Este valor se verifica con el parámetro de control y forma parte en la evaluación estructural.

La importancia de un modelo matemático de resistencia del suelo, es la obtención del valor del módulo resiliente, al término de la conformación de capas estructurales, a través de una representación gráfica, el cual es obtenida con las datas de campo, realizando ensayos con el equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer (LWD). Siendo relevante, ya que verifica en corto tiempo si el módulo resiliente de campo es mayor al módulo resiliente adoptado en el cálculo del diseño estructural del pavimento, con el fin de asegurar la resistencia del material del suelo.

La norma de referencia ASTM E2583, describe la importancia de uso del equipo LWD, la cual indica que, mediante este equipo se puede determinar el módulo elástico de las distintas capas granulares que conforman un pavimento. El LWD, es ideal para el control de calidad de la subrasante, subbase, base y capas delgadas de pavimento.

Los beneficiados con estos modelos de ajuste de carga, 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 capacidad de soporte y evaluar estructuralmente, llegando a optimizar recursos y tiempos en la construcción.

JUSTIFICACIÓN

Justificación teórica

La presente investigación se justifica porque aporta conceptos teóricos en el cálculo de las deflexiones llenando algunos vacíos de conocimiento, ya que al tener unos modelos de ajuste de carga para suelos, se obtiene la deflexión admisible, deflexión de campo y módulo resiliente a través de una representación gráfica obtenida con los datos de campo, haciendo uso del equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer, el cual, se podrá verificar la capacidad de soporte de cada capa estructural conformada y realizar una evaluación estructural, en diferentes tipos de estructuras del pavimentos, esto ayudara a mitigar fallas estructurales como hundimientos e identificar suelos inestables.

Un modelo de análisis mecánico, generará una nueva teoría para obtener la deflexión admisible en cada capa del pavimento, ofreciendo posibilidades fructíferas de explorar modelos de análisis mecánicos para diferentes tipos de estructura de pavimento.

Este modelo de análisis mecánico, se podrá usar en otros proyectos viales, donde su diseño de pavimento, coincidan con las mismas características del suelo y con los espesores de capa, de los 04 tipos de pavimentos flexibles desarrollados.

Unos modelos de ajuste de carga, generará una nueva teoría para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible, ofreciendo posibilidades fructíferas de explorar modelos matemáticos a través de una representación gráfica obtenida con los datos de campo haciendo uso del equipo LWD.

También, se podrá usar estos modelos de ajuste de carga en otros proyectos viales que tengan similares características del suelo y tipo de estructura de pavimento flexible.

Con unos modelos de ajuste de carga se espera que proporcione resultados de deflexión admisible, deflexión y módulo resiliente similares a los resultados generados a través de softwares y equipos comúnmente utilizados.

Por consiguiente, al lograr obtener resultados similares a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo con el equipo LWD, facilitara evaluar el comportamiento estructural de las capas de suelos de un pavimento flexible durante su ejecución.

Una de las razones de proponer unos modelos matemáticos, es de realizar ensayos en capas de suelos con el equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer.

Se sugiere nuevas investigaciones, para generar modelos matemáticos a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, con un equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer para diferentes tipos de estructura de pavimentos.

Referida a los módulos resilientes, se sugiere que su resultado sea investigado mediante ensayos en laboratorio a través de equipos modernos, con el fin de analizar con los resultados obtenidos en campo mediante el equipo Light Falling Weight Deflectometer.

Justificación práctica

La justificación práctica de esta investigación, es que unos modelos de ajuste de carga, facilitarán en corto tiempo y con pocos recursos realizar una evaluación estructural de capas de suelos de un pavimento flexible, a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo haciendo uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer.

Un modelo matemático de deformación del suelo, obtiene la deflexión de campo a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, mediante un equipo portátil LWD, el cual, permitirá verificar su capacidad de soporte de las capas conformadas inmediatamente después de realizar el ensayo.

Un modelo matemático de resistencia del suelo, obtiene el módulo resiliente de campo a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, mediante un equipo portátil LWD, el cual, permitirá verificar la resistencia del material de las capas conformadas inmediatamente después de realizar el ensayo.

Justificación metodológica

La justificación metodológica, es de contar con un nuevo procedimiento, para medir la deflexión admisible, deflexión de campo y módulo resiliente, mediante el aporte de unos modelos de ajuste de carga que, son conseguidos a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, mediante ensayos realizados con el equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer.

El proceso de obtención de modelos de ajuste de carga, ayudara como ejemplo para generar modelos, en capas de suelos de diferentes tipos de estructuras de pavimentos flexibles, a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo, mediante un equipo portátil LWD.

Se logrará tener un nuevo concepto, al uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer, ya que servirá para evaluar estructuralmente, capas de suelos de un pavimento flexible, mediante unos modelos de ajuste de carga.

1.4 Delimitación del Estudio

La presente investigación se realizó en la Panamericana sur Km. 4+450, de la ciudad de Lima - Perú, específicamente la delimitación espacial es, en la vía auxiliar Cristóbal de peralta entre las progresivas Km.0+850 y Km. 1+970, de la obra intercambio vial a desnivel el Derby – San Borja Norte.

En la delimitación espacial, se encuentran 04 tipos de estructuras de pavimentos flexibles.

El periodo de tiempo que abarca la investigación, comienza en conocer el diseño de pavimento, construirlo en obra, realizar ensayos al término de la conformación de cada capa del suelo, en gabinete realizar una representación gráfica obtenida con las datas de campo, estas con el fin de, contar con un modelo de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible.

Con la data del diseño estructura, de los 04 tipos de estructuras de pavimentos, se determinará un modelo de análisis mecánico del suelo para obtener el valor de deflexión admisible para la capa base, subbase y subrasante.

Durante la ejecución de los 04 tipos de 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. También, se realizó ensayos de deflexión en campo con un equipo tradicional denominado Viga Benkelman.

Con los datos del ensayo de deflexión, proporcionados por el equipo portátil LWD se determinó un modelo matemático de deformación del suelo para obtener el valor de deflexión de campo en los 04 tipos de estructura de pavimento a nivel de la capa base, subbase y subrasante.

Con los datos del ensayo de módulos de elasticidad, proporcionados por el equipo portátil LWD, se determinará un modelo matemático de resistencia del suelo para obtener el valor del módulo resiliente de campo en los 04 tipos de estructura de pavimento a nivel de la capa base, subbase y subrasante.

Determinando modelos de ajuste de carga, las cuales son, modelo de análisis mecánico del suelo, modelo matemático de deformación del suelo y modelo matemático de resistencia del suelo, se obtendrán los valores de, deflexión admisible, deflexión en campo, y módulo resiliente en campo con el fin de realizar la evaluación estructural de los 04 tipos de estructuras de pavimentos en la capa de base, subbase y subrasante haciendo uso de un equipo portátil Light Falling Weight Deflectometer.

En la delimitación teórica, se tendrán en cuenta los siguientes conceptos: deflexión admisible, deflexión de campo, módulo resiliente, caracterización del suelo en capas de tipos de pavimentos flexibles, cargas, uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer, uso del equipo Viga Benkelman, modelos matemáticos y evaluación estructural.

En la figura 01, se muestra la ubicación de los 04 tipos de estructuras del pavimentos flexibles, ubicados en la vía auxiliar Cristóbal de peralta, entre las progresivas Km.0+850 y Km. 1+970, de la obra intercambio vial a desnivel el Derby – San Borja Norte.

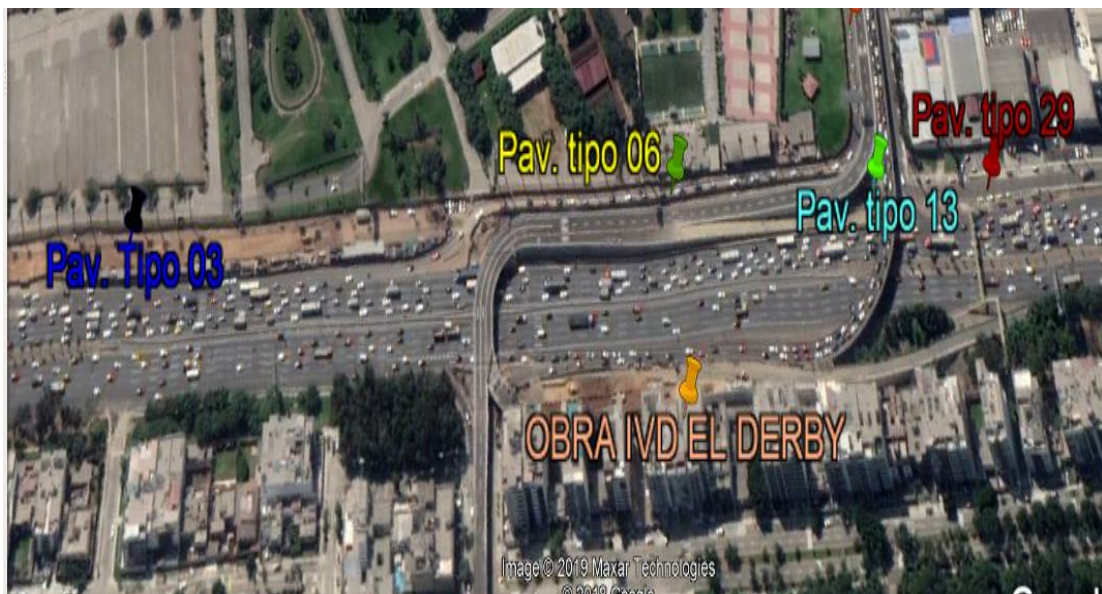


Figura 01: Obra IVD el Derby, ubicación de los 04 tipos de estructura del pavimento
Fuente: Google Maps

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Proponer un modelo de ajuste de carga a fin de evaluar estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible a través de una representación gráfica obtenida con la data de campo.

1.5.2 Objetivos específicos

- a. Determinar un modelo de análisis mecánico del suelo para obtener su deflexión admisible en cada capa estructural de un pavimento flexible.
- b. Proponer un modelo matemático de deformación del suelo, con la finalidad de obtener la deflexión en cada capa estructural de un pavimento flexible.
- c. Proponer un modelo matemático de resistencia del suelo, con la finalidad de obtener el módulo resiliente en cada capa estructural de un pavimento flexible.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Histórico

Para evaluar estructuralmente pavimentos en suelos, se debe conocer cómo se constituyó la estructura del pavimento, por lo que es necesario saber la evolución del diseño estructural del pavimento, según Corredor (2008), el desarrollo de los métodos de diseño se divide en tres etapas:

- Primera etapa: antes de la II Guerra Mundial.
- Segunda etapa: después de la II Guerra Mundial hasta 1988.
- Tercera etapa: a partir de 1988 hasta la actualidad.

Fue en la segunda etapa donde se decidió usar los llamados Ensayos de Carreteras, los cuales eran modelos a escala natural que han servido como base para los métodos de diseño, el principal de estos es el experimento vial de la AASHO en Estados Unidos, se construyó en 1956 cerca de Ottawa, Illinois seis tramos con el objetivo de obtener los parámetros necesarios referentes al comportamiento y deterioro de los pavimentos tanto flexibles como rígidos. En 1958 empezaron con las pruebas en los tramos construidos, en 1960 se analizan los datos obtenidos de todas las pruebas realizadas y en el año de 1962 se obtiene la primera guía provisional para el diseño de pavimentos (Corredor, 2008, pág. 1-14).

Fue revisada en el año de 1972, en función de la experiencia que fue acumulada tanto de éxitos como de fracasos, esta revisión dio origen a la Guía AASHTO-72, la cual, consideraba el factor tránsito. En 1986 se revisa la guía formulada en 1972 para dar origen a la nueva versión del método AASHTO “Guías para el Diseño de Pavimentos”, en esta nueva guía se ejecutan cambios sustanciales con respecto a la metodología.

Con el pasar de los años la AASHTO fue mejorando sus metodologías de diseño conforme al éxito y fallas que tenían sus guías, al tal punto que, en 1993, se revisó la guía de 1986, dando origen a la Guía AASHTO 1993, usada actualmente para el diseño de los pavimentos y en el año de 1998 se incorporan los conceptos mecánicos a la guía.

En el 2008, la AASHTO publica la Guía de Diseño de Pavimentos Mecanística-Empírica, (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide MEPDG en inglés), permite utilizar las reacciones del pavimento para predecir la vida que este tendrá basado en las observaciones de campo (Alonso, 2020, pág.11-14).

MEPDG 2008, considera el diseño de pavimentos flexibles y rígidos empleando principios mecánicos para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la estructura de pavimento. Esta respuesta estructural se relaciona empíricamente con la evolución del deterioro estructural y funcional del pavimento a lo largo de su vida útil (Chang, 2013, pág. 2)

Una vez conocido la evolución del diseño estructural de un pavimento, se indica que, la construcción de la estructura de los diferentes pavimentos estructurales a investigar, se realizó con el diseño de pavimento de la Guía AASHTO 1993.

Deflexión admisible

La estructura del pavimento a construir y evaluar estructuralmente en cada capa estructural debe contar con un parámetro de control de deflexión admisible, y estos han sido hallados mediante modelos, por lo que su retrospectiva es la siguiente:

Los intentos de representar, mediante modelos teóricos, sistemas de pavimentos flexibles datan de no hace más de 50 años, cuando Burmister desarrolla su teoría para modelos de capas elásticas basándose en los conceptos desarrollados por Boussinesq en 1885. Desde entonces, y con el advenimiento y uso de las computadoras, un avance sustancial se ha producido en los últimos años, habiéndose desarrollado una variedad de alternativas que van desde esquemas de capas elásticas lineales y no lineales, hasta modelos viscoelásticos ó dinámicos, diseñados en un constante afán de lograr simulaciones cada vez más compatibles con la realidad (Hoffman, 1985, pág.7).

En el año 1944, A.H.A. Hogg presentó la solución matemática del modelo que se conoce por su nombre. Este modelo representa al pavimento como una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita, sustentada por una capa elástica

homogénea e isotrópica, de espesor que puede ser infinito o limitado por una base rígida, horizontal y perfectamente rugosa (Hoffman, 1985, pág.8).

El estado del arte sobre mecánica de pavimentos permite encontrar varias expresiones de cálculo de deflexión admisible de un modelo estructural de pavimento flexible. Dichas expresiones fueron deducidas de manera experimental por diferentes autores, tal como se muestran en el cuadro 01 (Higuera, 2008, pág. 9).

Tabla 01:

Leyes de comportamiento de deflexión admisible de un modelo estructural de pavimento flexible.

Autor	Ley de comportamiento de la deflexión, milímetros
Criterio del Instituto del Asfalto	$\Delta_{z adm} = 25.64 N^{-0.2383}$
Criterio Checoslovaco	$\Delta_{z adm} = 8.035 N^{-0.16}$
Criterio de Yang H. Huang	$\Delta_{z adm} = 26.32202 N^{-0.2438}$
Criterio de la RTAC de Canadá	$\Delta_{z adm} = 65.024 N^{-0.30103}$
Criterio de Ivanov	$\Delta_{z adm} = 5.248 N^{-0.12}$
Criterio de Ruiz	$\Delta_{z adm} = 24.763 N^{-0.2523}$
Criterio de la AASHTO Road Test (Pt = 2.5)	$\Delta_{z adm} = 63.735 N^{-0.3077}$
Criterio de la CGRA de Canadá	$\Delta_{z adm} = 52.275 N^{-0.237}$
Criterio Belga	$\Delta_{z adm} = 242 N^{-0.334}$

$\Delta_{z adm}$: Deflexión vertical admisible, mm.

N : Número de ejes equivalentes acumulados de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

Pt : Índice de servicialidad final.

Fuente: (Higuera, 2008, pág. 10).

El manual de carreteras de suelos y pavimentos del MTC del Perú (2014), pág. 172, determina la deflexión admisible, adoptando la relación propuesta para el paquete estructural del pavimento, por CONREVIAl (Estudio de Rehabilitación de Carreteras del país. MTC-Perú):

$$D_{adm} = (1.15/N)^{0.25}$$

Donde:

D_{adm} = Deflexión admisible en mm.

N = Número de repeticiones de ejes equivalentes en millones.

En los últimos años se ha incrementado la implementación de software para analizar pavimentos flexibles, debido a que los métodos convencionales no presentan un estudio de manera apropiada, los cuales no permiten la obtención de valores en términos de esfuerzos, deformaciones (ϵ), deflexiones(δ) que se presentan en cada una de las capas de la estructura (Cruz, 2019, pág. 24).

Por lo descrito en el párrafo anterior, se origina el objeto de estudio para obtener la deflexión admisible de cada capa estructural, en diferentes tipos de estructuras de pavimentos, emplazados en la vía auxiliar Cristóbal de peralta de la obra IVD el Derby, proponiendo un modelo de análisis mecánico de suelos, apoyándose de programas informáticos que analizan la deflexión admisible.

Deflexión de campo

Al término de la conformación de la subrasante y capas granulares del pavimento en obras de carreteras, uno de los controles de calidad es la deflexión, el cual, son realizados mediante equipos que requieren varios recursos, como el equipo Viga Benkelman, desarrollada en el road test de la AASHO en 1952, que corresponde a la primera generación de medición de deflexión estática.

Posteriormente apareció el equipo dynaflect, donde realiza mediciones de deflexión por vibración sobre el pavimento. En la imagen 02, se muestra el equipo Dynaflect.



Figura 02: Equipo para realización del ensayo de deflexión –Dynaflect
Fuente: Dynatest

Actualmente los equipos de esta generación, se refiere a los equipos tipo impacto como el deflectómetro de impacto (FWD), que son usados sobre la carpeta de rodadura y no durante la conformación terminada de las capas de un pavimento, debido al alto costo para la realización del ensayo. En la figura 03, se muestra el equipo Falling Weight Deflectometer.



Figura 03: Deflectómetro de impacto Dynatest FWD 800
Fuente: Dynatest

Según Escobar (2007), la auscultación estructural de los pavimentos ha ido variando con el tiempo en función de los avances tecnológicos, requiriendo cada vez un mejor rendimiento de trabajo, una recolección sistemática de los parámetros del pavimento y menor daño físico y operacional al pavimento en estudio.

Otro equipo de esta generación es el equipo Light Falling Weight Deflectometer (LWD), el equipo es ligero, portátil y se utiliza generalmente para el ensayo de las distintas capas de suelos que conforma un pavimento flexible, sin embargo, como la carga de impacto al suelo es inferior a lo solicitado por el manual de ensayos de materiales 2017 del MTC, se origina un objeto de estudio, de obtener un modelo matemático de deformación del suelo en cada capa estructural, a fin de obtener la deflexión de campo, en diferentes tipos de estructuras de pavimento, a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo haciendo uso del equipo LWD.

En la figura 04, se muestra el equipo Light Falling Weight Deflectometer (LWD).



Figura 04: Equipo Light Falling Weight Deflectometer - PRIMA 100
Fuente: Manual del usuario Deflectómetro de impacto liviano (LWD)

Módulo Resiliente de campo

El cálculo del módulo superficial se basa en las ecuaciones de Boussinesq utilizando las deflexiones superficiales. Las ecuaciones de Boussinesq fueron desarrolladas en el año 1885. La teoría original de Boussinesq consiste en determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones en un semi-espacio infinito homogéneo e isotrópico de una capa, para una carga concentrada perpendicular a la superficie. Estos valores deben responder a la caracterización de la capa, por lo cual dependen del módulo de esta y su razón de Poisson. Con el tiempo esta teoría se fue desarrollando hasta poder ser aplicadas en sistemas multicapa para cargas circulares (Loria, 2015, pág. 2).

En el diseño de pavimentos, los módulos resilientes, se obtuvieron mediante el CBR del material, sin embargo, según la norma ASTM E2583(2015) indica que, mediante el equipo Light Falling Weight Deflectometer, se puede determinar el módulo elástico de las distintas capas granulares que conforman el pavimento.

Al realizar los ensayos en campo con el equipo LWD, se desea aprovechar los datos de campo de módulos de elasticidad, sin embargo, la aplicación de carga debe ser ajustada, por lo que se origina el objeto de estudio, de proponer un modelo matemático de resistencia del suelo en cada capa estructural a fin de obtener sus módulos resilientes de campo a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo haciendo uso del equipo LWD.

Por otro lado, se han realizado varias investigaciones en tramos de prueba, en busca de correlaciones entre mediciones del LWD con otros equipos como FWD, el plato de carga y otros deflectómetros de impacto portátiles, como también con otras características de los materiales evaluados, por ejemplo, el valor de CBR, la densidad, etc.

Las correlaciones existentes que vinculan el módulo LWD y el módulo FWD son las siguientes:

Correlación determinada por Fleming et al., 2000.

$$M_{FWD} = 1.031 E_{LWD}$$

Determinada con 20 puntos medidos de una base granular de 250 mm apoyada sobre arcilla, con un R2 de 0,7.

Correlación determinada por Nazzal, 2003.

$$M_{LWD} = 0.97 E_{FWD}$$

Determinada con 25 puntos medidos de una granular capping de 450 mm apoyada sobre una arcilla limosa, con un R2 de 0,6.

Correlación determinada en el desarrollo de la UK Performance Based Specification, 2006.

$$M_{LWD} = 1.21 E_{FWD}$$

Determinada con 25 puntos medidos de una subrasante tratada con cal y cemento de 260 mm, con un R2 de 0,77.

Las correlaciones existentes que vinculan el módulo LWD y el módulo de otros equipos son las siguientes:

Correlación entre módulo LWD y módulo TFT determinada por Fleming et al., 2000.

$$M_{TFT} = 0.96 E_{LWD}$$

Determinada con 25 puntos medidos de una capa granular de 500 mm apoyada sobre una arcilla limosa, con un R2 de 0,92.

Correlación entre datos LWD y datos del PLT determinado por Kamuira et al., 2000.

$$\text{Log} \left(\frac{K_{LFWD}}{K_{30}} \right) = 0.0031 \cdot \log(K_{LFWD}) + 1.12$$

K_{LFWD} : Es el cociente entre la presión aplicada en la medición con el LFWD y la deformación producida por esta presión

K_{30} : Es el cociente entre la presión aplicada en la medición con el plato de carga (\varnothing 300 mm.) y la deformación producida por esta presión.

Determinada con puntos medidos en subrasante que contenía suelo volcánico y arena limosa y también suelo estabilizado con roca chancada.

Correlación entre módulo LFWD y módulo PLT determinado por Nazzal, 2003.

$$E_{PLT(i)} = 22 + 0.70 \cdot E_{LWD}$$

$$E_{PLT(R2)} = 20.9 + 0.69 \cdot E_{LWD}$$

Determinada con 36 mediciones en 4 diferentes materiales (suelo estabilizado con cemento y cal, arcilla y granular), con un R^2 de 0,92 y 0,94, respectivamente.

Correlación entre módulo LFWD y el valor de CBR determinado por Nazzal, 2003.

$$CBR = -14 + 0.66 \cdot E_{LWD}$$

Determinada con 19 mediciones, también en los mismos 4 materiales, con un R^2 de 0,83.

Finalmente, determinando estos modelos de ajuste de carga de suelo, da origen al objeto del estudio principal, ya que mediante estas se obtiene los valores de deflexión admisible, deflexión de campo y módulos resilientes de campo, con la que se podrá realizar la evaluación estructural de pavimentos en suelos a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo haciendo uso del equipo LWD.

2.2 Investigaciones Relacionadas con el Tema

Escobar, García y Guzmán (2007), realizaron un tema de tesis denominado “Análisis comparativo de pavimentos por medio de la viga benkelman y el deflectómetro de impacto falling weight deflectometer”, en la cual determinaron una ecuación de

correlación entre las deflexiones medidas tanto por el deflectómetro de impacto como por la viga Benkelman, definida así, $d_{FWD} = 1.21041 d_{VB} - 1.888$, donde d_{FWD} es la deflexión calculada del deflectómetro de impacto y d_{VB} es la deflexión medida con la viga benkelman, aclarando que los datos tienen un año de separación en su medición, sin embargo, se realiza en condiciones climáticas similares(p.90).

En la figura 05, se muestra la deflexión obtenida por el equipo FWD y viga Benkelman con el fin de evaluar la estructura del pavimento (p. 83).

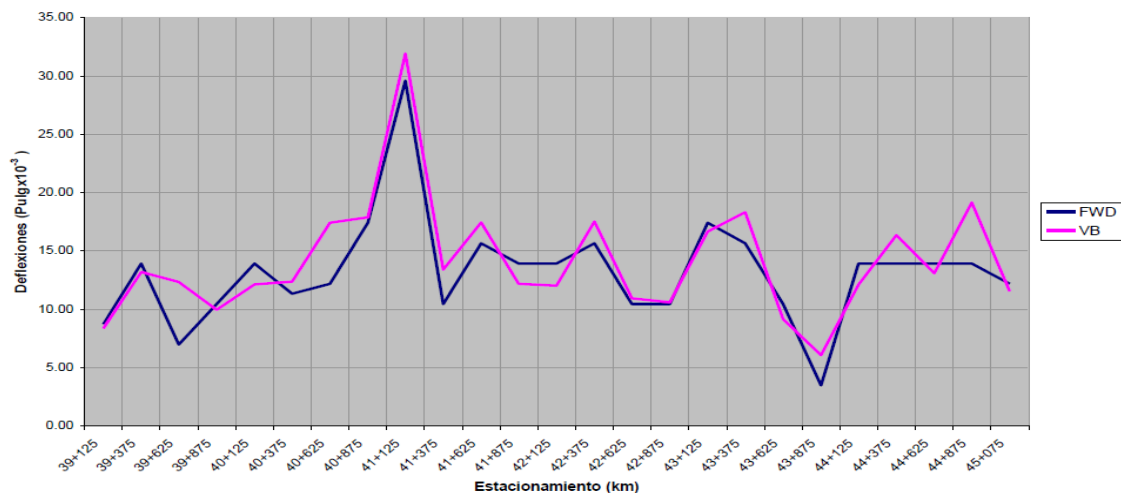


Figura 05: Deflectograma – LWD y Viga Benkelman
Fuente y Elaboración: Escobar, García y Guzmán (2007)

Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015), realizaron un tema de investigación denominado “Estudio comparativo de los valores de módulo resiliente obtenidos con equipos LWD y laboratorio”, en la cual presentaron un estudio comparativo LWD y viga Benkelman en el tramo 1, primero se realizaron ensayos con el equipo LWD y posteriormente con la viga Benkelman. La temperatura local era de 29° C y la humedad era de 76%.

Se comprobó *in situ* que el material de la capa de regularización provenía de un corte y un vertedero, con características visuales táctiles de un suelo-arcilloso amarillento. Incluso, después de la compactación se observaron pequeñas fisuras en la capa acabada y también una posible diferencia de suelo entre el tramo ensayado, con una coloración y textura distintas.

En la figura 06, se muestran los valores de las desviaciones obtenidas por los equipos utilizados.

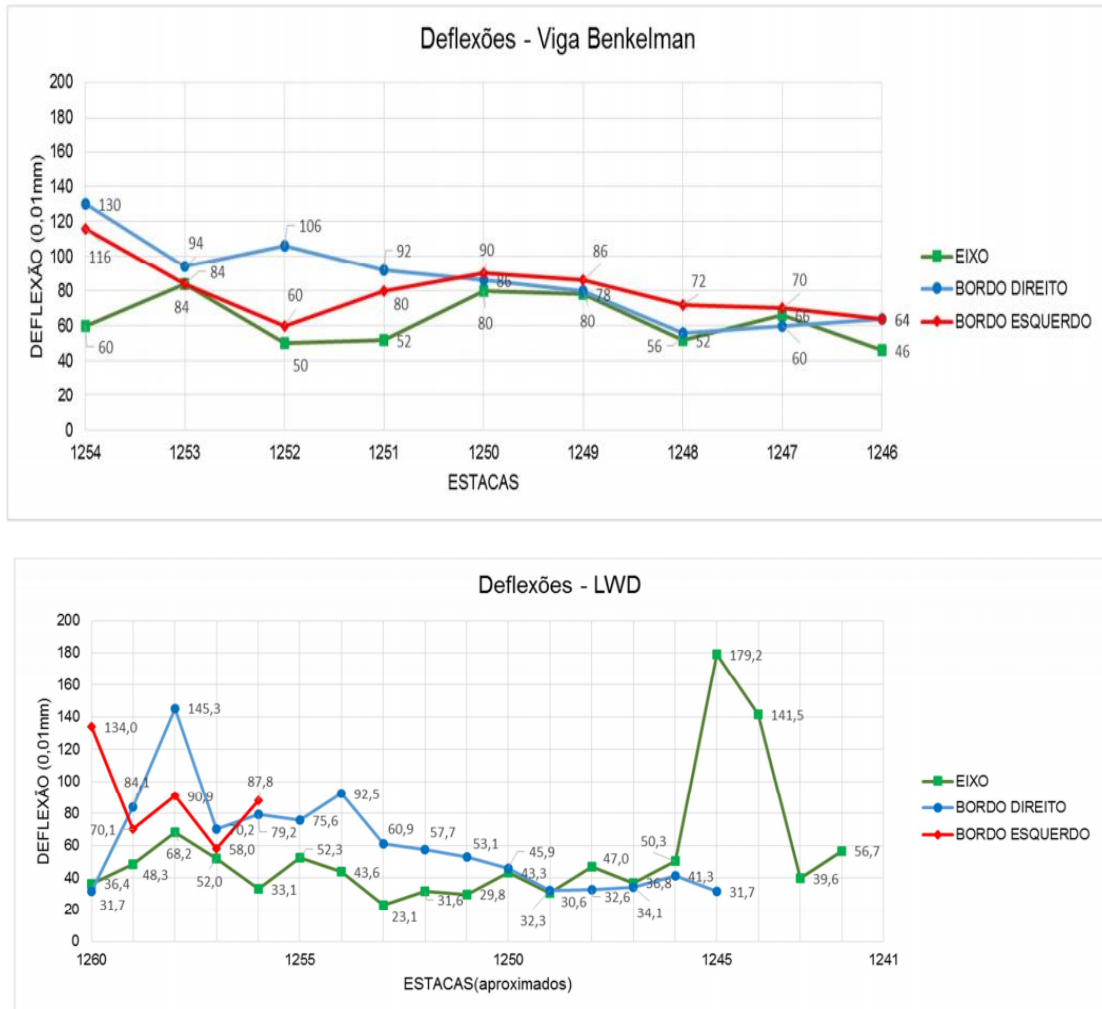


Figura 06: Gráfico con las curvas de deflexión del tramo 1–Viga Benkelman y LWD Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

En las lecturas realizadas por la viga se observa que los valores son aproximados, pero con mayores resultados para el borde derecho, valores de deformación coherentes debido a la ubicación de cada ensayo, pero que está dentro de los valores especificados en diseño que es de 130 x 0.01mm.

Lo mismo ocurre con los valores del LWD, en donde los valores del borde derecho son mayores, sólo desde el emplazamiento de 15m., existe un pico del valor de desviación, muy probablemente esos lugares deberían ser ensayados nuevamente, a fin de comprobar.

Al transcurrir las lecturas realizadas in situ por el LWD, se verificaron las existencias de variaciones acentuadas de los valores de módulo de deformación resiliente para el tramo de ensayo, para un mismo tipo de suelo y una misma finalidad, soporte de la subrasante. Estos valores encontrados varían entre 18,33 MPa a 146,10 MPa, según Café (2014) y en la Tabla 02, se presentan los resúmenes de los resultados.

Tabla 02:

Resumen de los resultados realizados con LWD.

Descripción (LWD)	Valores
Cantidad de puntos sometidos a ensayo	39
Media aritmética – in situ (X_m)	69,19 MPa
Desviación estándar – s	29,96 MPa
Coefficiente de variación - v	43,3%

Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

De los resultados obtenidos, se buscó determinar las tensiones verticales para cada local sometido a ensayo, como muestra Café (2014) y en la Tabla 03, se presenta el resumen de los resultados.

Tabla 03:

Resumen de los resultados de las tensiones verticales

Descripción (σ_1)	Valores
Cantidad de puntos sometidos a ensayo	39
Media aritmética – in situ (X_m)	85,2933 KPa
Desviación estándar – s	0,0508 KPa
Coefficiente de variación - v	0,06%

Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

En el tramo 2, se realizaron lecturas con los equipos deflectométricos en el terraplén y banda 1, comenzando en la estaca 2251 yendo hasta la estaca 2268, con espaciamiento de 40 m. Los primeros ensayos en las estacas impares y el segundo, en la dirección opuesta las estacas pares.

Primero se realizaron las lecturas con la viga Benkelman en la dirección del estancamiento a cada 2 estacas, comenzando en el recodo en la estaca 2251 a la estaca 2267, y en la pista 1 de la estaca 2268 a la estaca 2252 y, posteriormente, se iniciaron los ensayos con equipo portátil, utilizando los mismos locales ensayados por la viga, como

la misma referencia y balizamiento. La temperatura local variaba entre 27°C a 29°C y humedad del 72%.

Por otro lado, según Café (2014), en el transcurso de las lecturas se verificó las existencias de variaciones de valores de módulo de resiliencia para el tramo en estudio para un mismo tipo de suelo y una misma finalidad. Estos valores oscilan entre 62,15MPa y 146,74 MPa.

En la Tabla 04, se encuentran los valores medios del módulo resiliente realizados con el LWD para las dos situaciones distintas, incluidos todos los puntos analizados y sin los valores que se han ignorado, debido a la gran diferencia encontrada en las desviaciones.

Tabla 04:
Resumen de los resultados realizados con LWD

Descripción (LWD)	Valores -Acoplamiento		Valores –Rango 1	
Cantidad de puntos sometidos a ensayo	8	6	9	8
Media aritmética – in situ (X_m)	88,91 MPa	97,23 MPa	121,79 MPa	127,90 MPa
Desviación estándar – s	20,52 MPa	15,98 MPa	26,18 MPa	20,00 MPa
Coefficiente de variación – v	23,08%	16,43%	21,50 %	16,53 %

Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

De los resultados obtenidos, se buscó determinar las tensiones verticales para cada lugar sometido a ensayo, como se muestra en la Tabla 05.

Tabla 05:
Resumen de los resultados de las tensiones verticales

Descripción (σ_1)	Lado de la carretera	Franja
Cantidad de puntos sometidos a ensayo	9	9
Media aritmética – in situ (X_m)	85,3042 KPa	85,3061 KPa
Desviación estándar – s	0,0037 KPa	0,0027 KPa
Coefficiente de variación - v	0,004%	0,003%

Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

En la Figura 07, se muestran los gráficos con los resultados de desviación encontrados in situ.

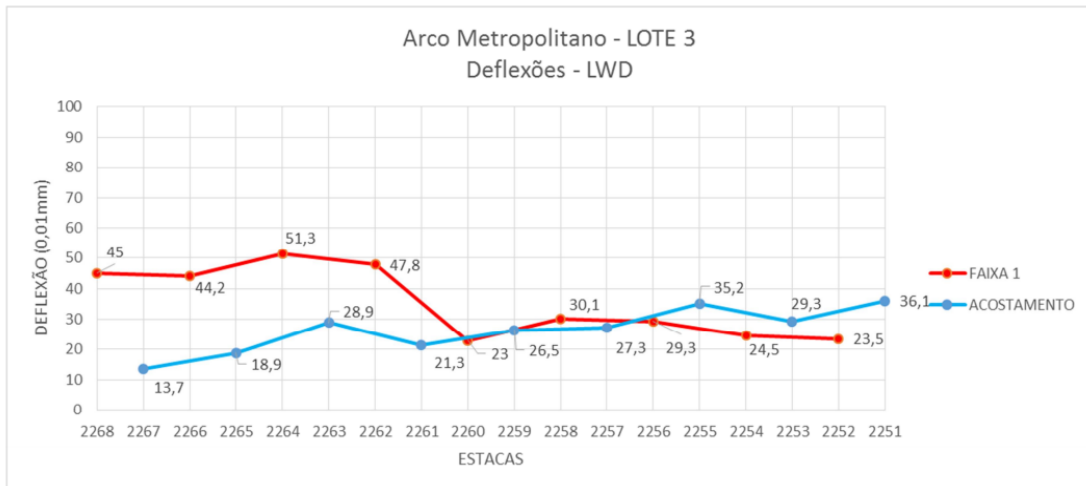
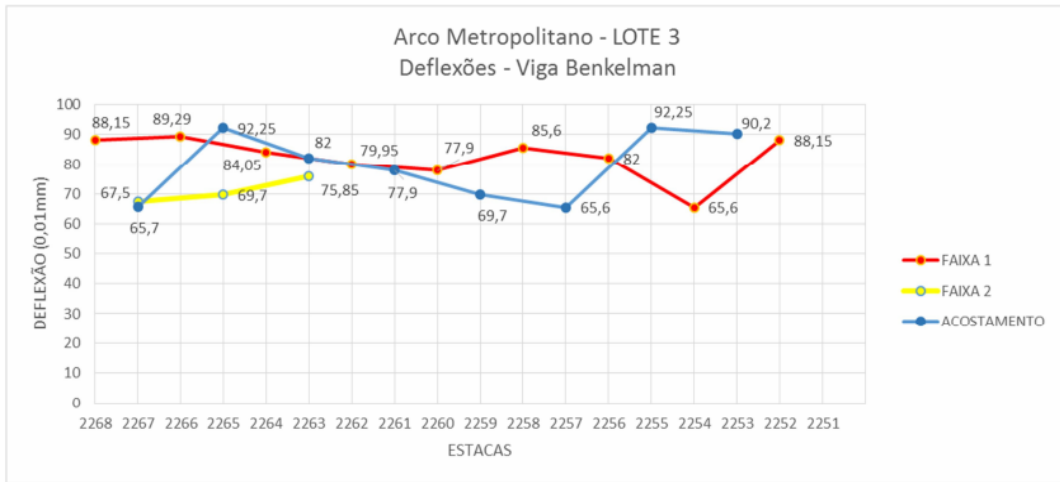


Figura 07: Gráfico con las curvas de deflexión del tramo2 – LWD y Viga Benkelman Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

En las lecturas realizadas por la viga se comprueba que los valores son próximos, pero con resultados mayores para el acoplamiento, los valores son coherentes para la deformación debido a la localización de cada ensayo, y están dentro de los valores especificados en diseño que es de 130 x 0.01mm. Lo mismo ocurre con los valores de LWD, donde hay una inversión de valores a partir de la estaca 2260 y 2259.

En el tramo 3, se utilizó experimentalmente para estudiar un modelo de estructura de suelo, donde se realizaron mezclas de escoria con suelo para la capa de regularización de

relleno. Al todo se utilizaron alrededor de 1800 toneladas de mezcla de escoria y material de yacimiento Silva (2013).

En total se realizaron 11 puntos de ensayo para evaluar el comportamiento mecánico en extracto, como se muestra en la Tabla 06.

Tabla 06:

Resultados de los ensayos LWD

PUNTO	Sm (mm)	s/v	MR(MPa)
1	2,393	4,762	14,1
2	3,580	6,417	9,43
3	2,138	5,759	15,79
4	0,723	3,00	46,68
5	2,057	5,854	16,41
6	1,279	3,793	26,39
7	0,877	3,191	38,48
8	0,780	3,71	43,27
9	1,790	4,334	18,85
10	1,627	5,263	20,74
11	1,625	5,826	20,77

Fuente y Elaboración: Alves, Ribeiro, Santana y Guimarães (2015)

Los resultados presentados indican que sólo 3 de los 11 puntos no necesitan sufrir compactación adicional, es decir, sólo los puntos 4, 7 y 8 el s/v es menor 3,5 (p. 9 - 15).

Deol, Kumar y Rakesh (2016), realizaron un tema de tesis denominado “Estudios comparativos del deflectómetro ligero liviano (LWD) y deflectómetro de viga benkelman (VB) en carreteras de bajo volumen”, en la cual compararon los valores de MR obtenidos con equipos LWD y en laboratorio, realizaron un estudio comparativo de módulos de subrasante por desviación estática y dinámica usando un deflectómetro de impacto liviano y un deflectómetro convencional viga benkelman en carreteras de bajo volumen. Las pruebas de campo y laboratorio se realizan en 40 puntos de prueba, en una carretera en servicio de 2 km de extensión que contiene tres tipos comunes de suelos cohesivos (CH,CI y CL).

Se estima que la respuesta estática y dinámica del pavimento determinan la estática, retrocálculo y módulos compuestos de subrasante.

El retrocálculo y módulos compuestos de subrasante se validan con un contenido de humedad dado utilizando pruebas triaxiales repetidas.

Los valores de módulo estático están en el lado inferior en comparación con los valores de módulo dinámico, mientras que el compuesto y los módulos de laboratorio de la subrasante son aproximadamente consistentes con 2% a 7% de variación, respectivamente. Análisis de correlación entre módulos estáticos y dinámicos de los diferentes tipos de suelos de subrasante representan una buena correlación de determinación (R^2) varía entre 0,75 y 0,91. Posteriormente, validación de módulos estáticos con relación de demora de California (CBR) los módulos de subrasante relacionados muestran una correlación moderada de 0,67 a 0,74.

Los módulos muestran una buena correlación de 0,74 a 0,93 para diferentes tipos de suelos, respectivamente.

Por lo tanto, el análisis comparativo muestra que el deflectómetro liviano proporciona confiabilidad valores de módulo de subrasante, y se puede utilizar como una herramienta rápida de evaluación de resistencia de subrasante para carreteras de bajo volumen (p 438).

Balarezo (2017), realizó un tema de tesis denominado “Evaluación estructural usando una viga Benkelman aplicada a un pavimento”, en la cual concluye que la evaluación estructural usando viga Benkelman permite entender cómo se realiza la evaluación estructural de los pavimentos por la deflectometría y la importancia de esta metodología (p. 111).

Precisa que una vez tomadas las lecturas de campo es necesario obtener una lectura final en cada estación, para esto se resta las lecturas consecutivas acumulando las deflexiones desde la lectura final (0) a las diferentes distancias, de esta manera se obtienen las deflexiones a cada distancia; cabe indicar que las lecturas de campo miden la recuperación del pavimento, pero no las deflexiones (p. 40).

Los resultados obtenidos de la evaluación estructural usando la viga Benkelman deben ser analizados estadísticamente con la finalidad de obtener valores característicos como

resultado final, de esta forma se puede tomar decisiones del estado y espesor de refuerzo estructural de todo el pavimento evaluado o de cada sector según se trabaje (p. 70).

Osorio (2007), realizó un tema de tesis denominado “Metodología de evaluación in-situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el deflectómetro de impacto liviano”, en la cual su metodología experimental propone la construcción de un pequeño tramo de prueba para realizar mediciones y a partir de sus resultados definir la configuración específica del LWD para evaluar cada capa con las condiciones particulares de terreno.

En este tramo de prueba es importante que se cumplan en forma rigurosa todas las especificaciones de construcción del Manual de Carreteras para poder llegar a valores confiables para la realización de las mediciones.

Analizó las tensiones a las que se encuentran sometidas las capas granulares de un pavimento flexible y se definieron las presiones adecuadas para evaluar cada capa. Estas presiones se utilizaron en las mediciones realizadas en su investigación.

Mediante el análisis de variación de módulos aceptables, ha determinado que el coeficiente de variación de los módulos de las capas evaluadas (que tengan las mismas características) debe ser $\leq 5\%$.

Por otro lado, el coeficiente de variación punto a punto para todas las mediciones realizadas fue bajo (máximo 3%), con lo cual se puede concluir que la repetibilidad del LWD es alta.

Además, de los resultados obtenidos se puede decir que existe una tendencia de que el LWD dé valores de módulos compuestos de capas granulares similares a los valores obtenidos en forma teórica por el método Shell.

Por lo que se recomienda utilizar este método dentro de la metodología propuesta para evaluar las capas granulares con el LWD.

A partir de estos resultados, este estudio propone una metodología de evaluación en terreno del MR de las capas granulares de un pavimento, a través de una metodología experimental que deberá realizarse para cada proyecto en particular.

El plato de carga a utilizar en las mediciones con el LWD se debe definir según los resultados de las mediciones del tramo experimental, debiendo seleccionarse aquel cuya media sea similar al módulo compuesto calculado por el método Shell.

El LWD, se puede utilizar como instrumento de evaluación de la capacidad de soporte de materiales granulares aplicando una metodología experimental en cada proyecto en particular.

AASHTO (1993), en la Guide for Design of Pavement Structures emplea una ecuación para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante, cuando la relación de Poisson es asumida como 0,5.

$$M_{rr} = \frac{0.24 \cdot P}{D_r \cdot r}$$

Donde:

M_{rr} = módulo resiliente de la subrasante retrocalculado (Lb/pulg²).

P = carga aplicada (Lb).

D_r = deflexión medida a una distancia r del centro del plato de carga (pulg).

r = distancia desde el centro del plato de carga (pulg).

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

Herrera (2009), describe que la modelación matemática permite la representación de un problema de la vida real como un problema matemático a resolver.

Para desarrollar la modelación es preciso seguir una secuencia básica que consiste en: identificar las variables del problema, determinar el objetivo que persigue el proceso y crear el modelo que se ajuste a las características del mismo.

Según la ASTM D5858-96, mediante una expresión realiza la estandarización que consiste en correlacionar linealmente la fuerza aplicada con un valor estándar establecido de 40 kN para cada una de las deflexiones registradas en los sensores.

Huang (1993), describe que es bien sabido que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos ya que experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga llega a ser casi completamente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, pudiendo considerarse elástica.

Gutiérrez (2015), indica que un material es considerado no lineal si el valor del módulo elástico depende del estado de tensión actuante en el mismo.

Según Hidalgo (2007), el pavimento es una estructura de cimentación formada por una o más capas, sobre la que actúan cargas repetidas provenientes de los vehículos en su superficie y que debe de ser capaz de transmitir durante su vida útil las tensiones provocadas por las estas hacia la subrasante y hacia los materiales constitutivos de sus capas, de tal forma que no se superen las tensiones y deformaciones específicas admisibles del suelo de cimentación.

Superficie subrasante, es la que corresponde a la superficie superior del terreno de fundación al finalizar el movimiento de tierras (corte o relleno).

La subbase, es la capa de material seleccionado que se coloca encima de la subrasante.

La base es la capa que tiene por finalidad absorber los esfuerzos transmitidos por la carga de los vehículos y además repartir uniformemente estos esfuerzos a la subbase y al terreno de fundación.

Según las especificaciones técnicas generales (2013), para la capa estructural de subbase precisa los requerimientos de las características granulométricas.

En la tabla 07, se muestra el requerimiento granulométrico para una gradación B.

Tabla 07:

Requerimientos granulométricos para subbase 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 08, se muestra los requerimientos de las características de los agregados para ser empleado para una capa estructural de subbase granular

Tabla 08:

Requerimientos de agregados para subbase granular

Ensayo	Norma	Requerimiento
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	50% máx.
Próctor Modificado	MTC E 115	-
CBR *	MTC E 132	40% mín.
Límite Líquido	MTC E 110	25% máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	6% máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	25% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	1% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	ASTM D 4791	20% máx.

* Referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una Penetración de Carga de 0.1" (2.5 mm)

Fuente: Especificaciones Generales 2013 del MTC

Elaboración: Propia

Según las especificaciones técnicas generales (2013), para la capa estructural de base, precisa los requerimientos de las características granulométricas, en la tabla 09, se muestra el requerimiento granulométrico para una gradación B.

Tabla 09:

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 10, 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 10:

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 11, 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 11:

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 12, se muestra los requerimientos de las características de los agregados, para ser empleado para una capa estructural de base granular.

Tabla 12:
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

Según Escobar (2007), describe en forma general que hay tres tipos de equipo para determinar las deflexiones del pavimento según metodologías no destructivas los cuales son:

- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas estáticas.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas vibratorias.
- Equipos de medición de deflexiones por medio de cargas de impacto.

Para cualquiera de ellos el principio es el mismo y consiste en aplicar una carga de magnitud conocida a la superficie del pavimento y medir las deflexiones.

Escobar (2007), describen que la evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad resistente del sistema en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función de demanda de tráfico.

El programa PitraPave (2015), calcula las deflexiones admisibles considerando un modelo multicapa a nivel de carpeta asfáltica, base, subbase. La fórmula de Bousineq calcula la deflexión admisible considerando un modelo unicapa a nivel de subrasante mediante la siguiente expresión.

$$\Delta_0 = \frac{2(1-\mu^2)qa}{E}$$

Donde:

Δ_0 : Deflexión admisible

q: Presión de contacto

a: Radio de carga

E: Módulo de elasticidad de la fundación

Castillo, Pérez, y Moya (2017), describen que la teoría de multicapa elástica es un método matemático para calcular las respuestas (deformación unitaria, esfuerzos y deflexiones) en una estructura con múltiples capas de espesor finito; exceptuando la última capa, la cual se supone con espesor y extensión infinita.

Según Solminihaç (2005), la deflexión es la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga, y es función no sólo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida. Generalmente, se realiza en forma no destructiva y se utiliza para relacionarla con la capacidad estructural del pavimento.

Según el manual de ensayos del MTC, la Deflexión máxima (D_0), también nombrada real o verdadera (sin corrección), es calculada por la siguiente fórmula:

$$D_0 = (LF - LI) \times RB$$

Donde:

D_0 = Deflexión máxima (0.01 mm)

LF = Lectura final

LI = Lectura inicial

RB = Relación de brazos.

Garnica (2002), indica que, en los primeros ciclos de carga, la deformación permanente es considerable, como lo indica la deformación plástica.

En la Figura 08, al incrementar el número de repeticiones, la deformación plástica debida a cada aplicación de carga decrece.

Después de algunos miles de repeticiones de carga, la deformación es casi totalmente recuperable, como lo indica la deformación recuperable, ϵ_r , llegando a una condición de

equilibrio, siempre que el esfuerzo desviador sea lo suficientemente pequeño para no llevar la muestra a la falla.

Esta figura 08, corresponde a una curva típica de los datos obtenidos en los primeros ciclos de carga de una prueba de compresión dinámica en condiciones edométricas.

En la Figura 08, se aprecia que la acumulación de la deformación permanente presenta tres fases: la primera es casi instantánea, se presenta en las primeras decenas de ciclos de carga, y en ella se produce aproximadamente el 70% de la deformación total.

Posteriormente, se presenta una fase transitoria en la que la deformación se acumula gradualmente durante los primeros miles de ciclos de aplicación de la carga.

Finalmente, se alcanza una fase estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación permanente tiende a su máximo valor. A partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene prácticamente ningún efecto adicional (Garnica et.al., 2002).

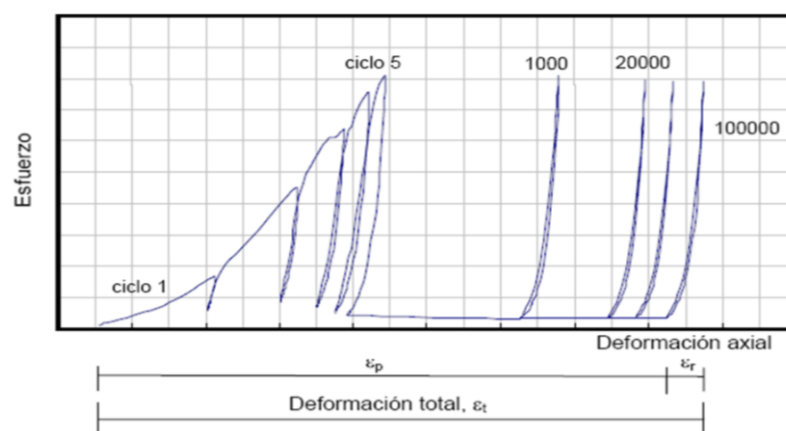


Figura 08: Acumulación de la deformación con el número de ciclos

Un material es considerado no lineal si el valor del módulo elástico depende del estado de tensión actuante en el mismo.

La deformación recuperable ϵ_r , es una deformación elástica o resiliente, condición en la cual el material es considerado en estado resiliente, permitiendo, en esas condiciones, determinar el denominado “Módulo de Resiliencia”.

Este módulo, se define como el cociente entre la tensión desviadora dinámica aplicada y deformación unitaria resiliente producida por esta tensión dinámica (Seed et al, 1962). En otras palabras, el módulo resiliente es el módulo elástico medido cuando el material alcanza su etapa de resiliencia.

Papagiannakis y Masad (2008), señalan que el módulo resiliente en los suelos depende del nivel de carga axial, el grado de confinamiento (a mayor confinamiento mayor módulo), el nivel de compactación-densificación y de factores intrínsecos del suelo tales como graduación, contenido de finos y humedad al momento de compactar.

Según Pérez (2018), indica que el coeficiente de Poisson (ν) es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo.

Quiñonez (2015), define el módulo Poisson (ν) como la relación entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial en una probeta con carga axial. El módulo Poisson es la constante, que relaciona el módulo de rigidez y el módulo de Young en la siguiente ecuación

$$E = 2G(\nu + 1)$$

Donde E es el módulo de Young, G es el módulo de rigidez y ν es el coeficiente de Poisson. La fórmula sólo es válida dentro del límite elástico de un material.

En la norma ASTM E-132 se proporciona un método para determinar el coeficiente de Poisson.

El módulo Elasticidad se obtiene a partir de ensayos de compresión no confinada (compresión simple), sin embargo, las masas de suelo presentan confinamientos. Entonces bajo un determinado nivel de confinamiento. Se define el módulo de elasticidad como la relación de esfuerzo aplicado y la deformación resultante.

$$\text{Módulo de elasticidad } E = \frac{\sigma}{\varepsilon_L}$$

Osorio (2008), indica que el equipo LWD se puede utilizar como instrumento de evaluación de la capacidad de soporte de materiales granulares aplicando una metodología experimental en cada proyecto en particular.

Rodríguez (2018), describe que el LWD es un equipo útil y versátil, de gran repetitividad y reproducibilidad con un módulo que toma en cuenta el efecto Shell. Los módulos en las bases granulares dependen directamente de la presión aplicada.

Su uso es totalmente recomendado para el estudio de las bases granulares para determinar homogeneidad, si existe algún problema de compactación o la existencia de una subrasante de mala calidad, sin embargo, para realizar un análisis de tensiones se recomienda utilizar los valores f obtenidos de esta investigación o realizando una calibración in situ utilizando la metodología de la presente investigación, ya que los factores f que se utilizan en la literatura y en el software mePads, en la mayoría de los casos son de origen desconocido o para materiales y condiciones distintas a las de las estructuras de pavimentos utilizados en Chile.

Según la ASTM E2583 (2015), indica que el equipo (LWD) Light Weight Deflectometer es ligero, portátil y se utiliza generalmente para el ensayo de las distintas capas granulares que forma el pavimento. Mediante este equipo se puede determinar el módulo (E) de las distintas capas granulares que conforman el pavimento.

Es ideal para el control de calidad de la subrasante, subbase y capas delgadas de pavimento.

Este método de ensayo cubre la determinación de la deflexión de la superficie como consecuencia de la aplicación de un impulso de carga. Las deflexiones resultantes se miden en el centro de la carga aplicada y también puede ser medido a varias distancias fuera de la carga.

Calderón (2015), refiere que el deflectómetro de impacto liviano (Light Weight Deflectometer –LWD) es un equipo que permite evaluar en terreno el módulo resiliente (M_r) que los métodos actuales de diseño estructural de pavimentos flexibles, incluida la nueva guía de diseño AASHTO 2008, que utilizan como indicador la capacidad estructural de las capas granulares.

La utilización de este equipo, está enfocada como una herramienta de control in-situ de las capas granulares colocadas, considerando que el principal aporte de las capas granulares en un pavimento flexible es su capacidad estructural.

El parámetro que describe de mejor forma la capacidad estructural de estos materiales es el módulo resiliente (M_r), que corresponde al módulo elástico medido luego de la aplicación de cargas cíclicas, estado en el cual los materiales granulares tienen un comportamiento elástico o resiliente. (p.8).

Osorio (2008), describió que 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 (p .4).

Fleming (2000), menciona que en los últimos años han aparecido en el mercado regional deflectómetros de impacto más livianos y económicos, denominados comúnmente LWD.

En un principio se han empleado en la verificación de la compactación de capas de base, debido a que por ejercer cargas mucho menores que las del FWD, no pueden ser empleados sobre capas asfálticas o incluso sobre capas de base muy fuertemente cementadas

Montejo (2002), describe que se entiende por deflexión a la deformación elástica que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga rodante estándar.

En la tabla 13, se presenta el campo de acción de la viga Benkelman en el desarrollo de las diversas actividades de la ingeniería de los pavimentos.

Tabla 13:

Acción de la Viga Benkelman en el desarrollo de las diversas actividades de la ingeniería de los pavimentos.

Utilización de las medidas de deflexión		
Etapas de la vida del pavimento	Objetivos	Localización de las medidas
construcción	<ul style="list-style-type: none"> -Apreciar la resistencia de las diferentes capas de la estructura. -Determinar el grado de homogeneidad -Localizar las áreas débiles para reparación -Ajustar las dimensiones de las capas sucesivas. 	Al nivel de subrasante y de las diferentes capas de la estructura

Fuente y Elaboración: Montejo (2002)

Rodríguez (2002), indica que, en términos generales, en todo modelo matemático se puede determinar 3 fases:

- Construcción del modelo. Transformación del objeto no-matemático en lenguaje matemático.
- Análisis del modelo. Estudio del modelo matemático.
- Interpretación del análisis matemático. Aplicación de los resultados del estudio matemático al objeto inicial no-matemático.

El éxito o fracaso de estos modelos es un reflejo de la precisión con que dicho modelo matemático representa al objeto inicial y no de la exactitud con que las matemáticas analizan el modelo.

2.4 Definición de términos básicos

Pavimento: 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. Por lo general está conformada por las siguientes capas: base, subbase y capa de rodadura (Manual de carreteras, 2014, pág. 21).

Suelos: Es un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en agua. (Montejo, 2002, pág. 39).

Suelos granulares: Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz N° 200. (Montejo, 2002, pág. 44).

Subrasante: Es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado. (Manual de carreteras, 2014, pág. 20).

Subbase: Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta (Manual de carreteras, 2014, pág. 21).

Base: Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito (Manual de carreteras, 2014, pág. 21).

Deflexión: Es la deformación elástica que sufre un pavimento bajo la acción de una carga rodante normalizada. Mediante ella es posible evaluar el debilitamiento progresivo de la estructura debido a las solicitaciones del tránsito de lo utiliza (Manual de ensayo de materiales, 2017, pág. 962).

Deflexión admisible: Es la deflexión tolerable que garantiza un comportamiento satisfactorio del pavimento en relación con el tráfico que debe soportar (Manual de carreteras, 2014, pág. 172).

Módulo resiliente: Es el cociente entre magnitud del esfuerzo desviador en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (Calderón, 2015, pág. 23).

Pitrapave: Es un software de multicapa elástica general para el análisis estructural de pavimentos flexibles, el cual permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas (Pitrapave, 2015, pág. 1).

Viga Benkelman: Equipo que mide los desplazamientos verticales de un punto de contacto situado entre las ruedas duales del eje de carga (Ensayo de materiales, 2017, pág. 962).

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).

Modelo matemático: Un modelo matemático es una descripción, en lenguaje matemático, de un objeto que existe en un universo no-matemático (Rodríguez, 2002, pág. 1).

2.5 Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis

Con unos modelos de ajuste de carga, evalúan estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible, a través de datos de campo, obtenidos al realizar ensayos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer.

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

Teniendo en cuenta que la deflexión es la deformación de un material, el módulo resiliente es la recuperación de la deformación del material y la deflexión admisible es el parámetro de control obtenido mediante las características del material y carga actuantes.

A través de la data de campo, suministrada por el equipo LWD, se realizó unos modelos matemáticos que determinan la deflexión de campo y módulo resiliente.

En la figura 09, se muestra un resumen esquemático de la estructura teórica científica, ordenado jerárquicamente con el fin de captar el significado de las hipótesis.

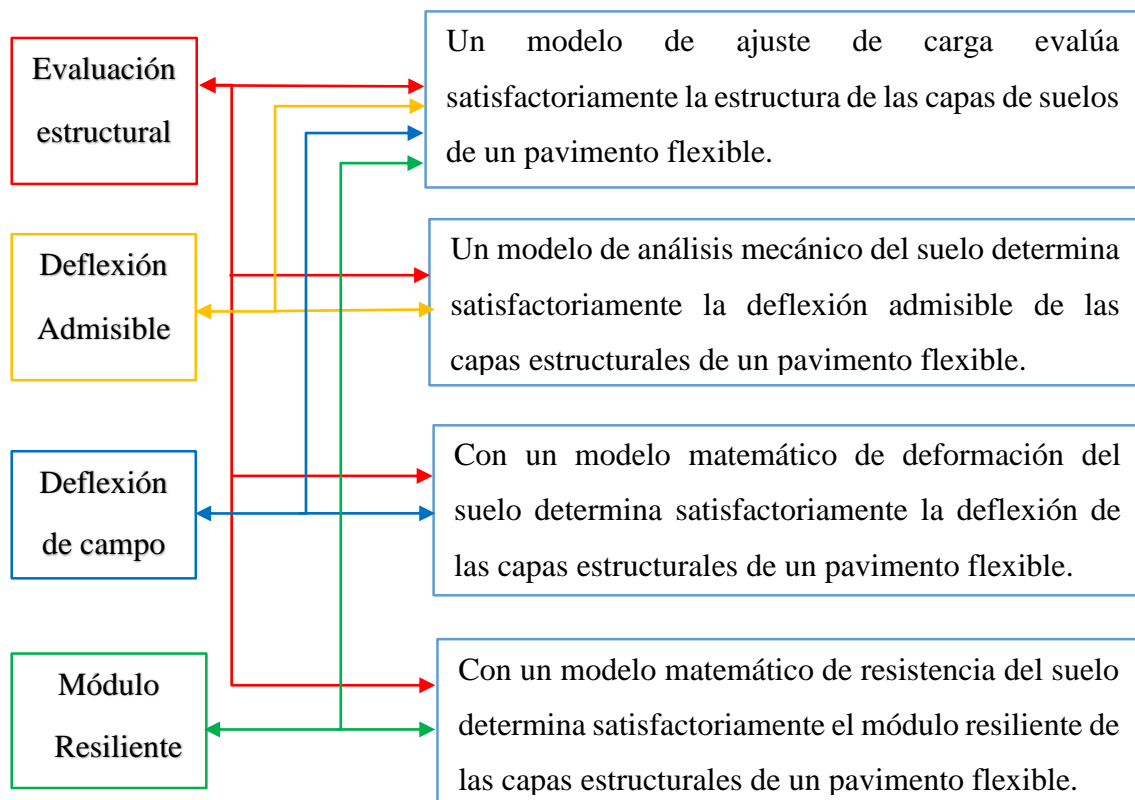


Figura 09: Fundamentos teóricos que sustenta a las hipótesis
Fuente y Elaboración: Propia

2.6 Hipótesis

2.6.1 Hipótesis general

Un modelo de ajuste de carga evalúa satisfactoriamente la estructura de las capas de suelos de un pavimento flexible.

2.6.2 Hipótesis Específicas

- a. Un modelo de análisis mecánico del suelo determina satisfactoriamente la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible.
- b. Un modelo matemático de deformación del suelo determina satisfactoriamente la deflexión de las capas estructurales de un pavimento flexible.
- c. Un modelo matemático de resistencia del suelo determina satisfactoriamente el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible.

2.7 Variables

En la Tabla 14, se muestra la variable independiente, variable dependiente de la hipótesis general.

Tabla 14:

Variable independiente y variable dependiente de la hipótesis general

Hipótesis General	Variable independiente	Variable dependiente
Un modelo de ajuste de carga evalúa estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible.	Modelo de ajuste de carga	Capas de suelos de un pavimento flexible

Fuente y Elaboración: Propia

En la Tabla 15, se muestra la variable independiente, variable dependiente de cada hipótesis específica

Tabla 15:

Variable independiente y variable dependiente de cada hipótesis específica

Hipótesis específicas	Variable independiente (causa)	Variable dependiente (efecto)
Un modelo de análisis mecánico del suelo determina la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible.	Modelo de análisis mecánico	capas de suelos de un pavimento flexible.
Un modelo matemático de deformación del suelo determina la deflexión de las capas estructurales de un pavimento flexible.	Modelo matemático de deformación del suelo	capas estructurales de un pavimento flexible.
Un modelo matemático de resistencia del suelo determina el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible.	Modelo matemático de resistencia del suelo	capas estructurales de un pavimento flexible.

Fuente y Elaboración: Propia

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo, Método y diseño de la Investigación

Por su orientación, la investigación es aplicada y por la naturaleza de las variables, la investigación es cuantitativa, de diseño experimental y por la forma de levantamiento de la información, longitudinal.

Se indica que es una investigación aplicada, por aplicar modelos matemáticos existentes que se aproximaron al valor patrón.

Según Hernández, S. et al, (2010), esta investigación tiene un diseño experimental. debido a que en este estudio se manipula las variables independientes, que son los modelos de ajuste de carga a través de una representación gráfica, obtenida con las datas de campo haciendo uso del equipo Light Weight Deflectometer, con el fin de obtener las variables dependientes que son los resultados de deflexión admisible, deflexión de campo y módulo resiliente.

Para el presente estudio se seleccionó el tipo de diseño cuasi – experimental.

La investigación cuasi-experimental utiliza un grupo experimental y otro denominado grupo de control. Al grupo experimental es al que se introduce un tratamiento o experimento, mientras que los grupos de control no tienen tratamiento o experimento.

En la figura 10, se muestra el esquema del diseño cuasi experimental, donde “O” es el resultado de la variable dependiente, “X” aplicación de la variable independiente, “- - -” selección no aleatoria, “GE” grupo experimental y “GC” grupo de control.

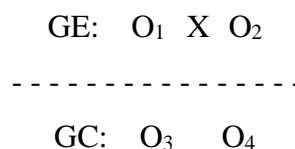


Figura10: Esquema del tipo de diseño cuasi experimental

3.2 Población y muestra

Población: Diferentes tipos de estructuras de pavimentos flexibles en capas de suelos.

Muestra: 04 tipos de estructuras de pavimentos flexibles en capas de suelos

El tipo de muestra que se va a emplear es, No probabilístico debido a que, la elección de los elementos depende de las características que se desea investigar (diferentes espesores de capas estructurales). Las muestras seleccionadas, se debieron a sectores donde se ejecutó las capas de suelos de un de un pavimento flexible donde se realizó el ensayo de 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 16.

Tabla 16:

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas para emplear	Instrumentos para utilizar
Datos base	Software Pitrapave y modelo de Bousineq
Ensayos de deflexión	Light Weight Deflectometer (LWD) y Viga Benkelman
Ensayos de módulo resiliente	Light Weight Deflectometer (LWD)
Modelo matemático	Ecuación de ajuste de carga para 40 KN

Fuente y Elaboración: Propia

En la figura 11, se muestra la realización de ensayos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer (LWD) y Viga Benkelman (VB) de brazo simple para la recolección de datos de deflexión y módulos resilientes.



Figura 11: Equipos Light Falling Weight Deflectometer (LWD) y Viga Benkelman (VB) de brazo simple para recolección de datos de deflexión y módulos resilientes
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 17, se muestra la matriz de análisis de datos.

Tabla 17:
Matriz de análisis de datos

Variable Dependiente	Indicador	Escala de medición	Estadísticos descriptivos	Análisis inferencial
Capas de suelos de un pavimento flexible	Deflexión admisible	Razón	Tendencia central: media, mediana y moda.	Coeficiente de Pearson
	Deflexión de campo		Dispersión: desviación estándar. Posición: cuartiles.	
	Módulo resiliente en campo		Forma: asimetría y la curtosis.	

Fuente y Elaboración: Propia

3.4 Descripción de procedimientos de análisis

3.4.1 Trabajos de gabinete previo a la construcción de un pavimento flexible

Deflexión admisible

Previo a la ejecución de los tipos de pavimentos, se estudió las características de las capas de los 04 tipos de estructuras de pavimentos, según su diseño estructural.

En la tabla 18, se muestra las características por capa de los 04 tipos de estructuras de pavimentos.

Tabla 18:
Características de los 04 tipos de estructuras de pavimentos

Tipo de pavimento	Sector	Capa	Espesor (cm)	CBR	E (psi)	μ
Pavimento tipo 3	Prog. Km 1+458.21 - Km 1+967 (C1)	Carpeta asfáltica	7	-	400000	0.35
		Base granular	15	100	30000	0.40
		Subbase	15	40	16500	0.40
		Subrasante	-	20	17380	0.45
Pavimento tipo 6	Prog. Km 0+943.94 - Km 1+458.21 (C1)	Carpeta asfáltica	8	-	400000	0.35
		Base granular	20	100	30000	0.40
		Subbase	15	40	16500	0.40
		Subrasante	-	15.9	15007	0.45
Pavimento tipo 13	Prog. Km 0+916.72 - Km 0+943.94 (C1)	Carpeta asfáltica	5	-	400000	0.35
		Base granular	15	100	30000	0.40
		Subbase	15	40	16500	0.40
		Subrasante	-	12	12526	0.45
Pavimento tipo 29	Prog. Km 0+825 - Km 0+916.72(C1)	Carpeta asfáltica	9	-	400000	0.35
		Base granular	20	100	30000	0.40
		Subbase	15	40	16500	0.40
		Subrasante	-	15	14594	0.45

Fuente: Estudio definitivo de ingeniería, IVD el Derby – San Borja Norte.
Elaboración: Propia.

También, se verifico las cargas de aplicación que actuaran sobre el pavimento, está según lo solicitado por las especificaciones técnicas generales 2013 del MTC del Perú, el cual, es lo siguiente:

- Peso del eje posterior 8200 kg. ó 82 KN.
- Presión de inflado de neumáticos: 0.56 Mpa. ó 80 PSI ó 5.6kg/cm²

Empleando estos datos, se calcula la dimensión del radio de contacto ó radio de la huella de una rueda.

Peso en eje: $Peje = 8200 \text{ kgf.}$

Peso en Rueda: $Prueda = \frac{Peje}{4} = 2050 \text{ kgf.}$

Presión del neumático: $Pn = 80\text{psi} \text{ ó } 5.6\text{kg/cm}^2$

área de contacto: $Ac = \frac{Prueda}{Pn} = 0.037 \text{ m}^2$

Dimensiones de huella según área circular: $Ac = \pi a^2$

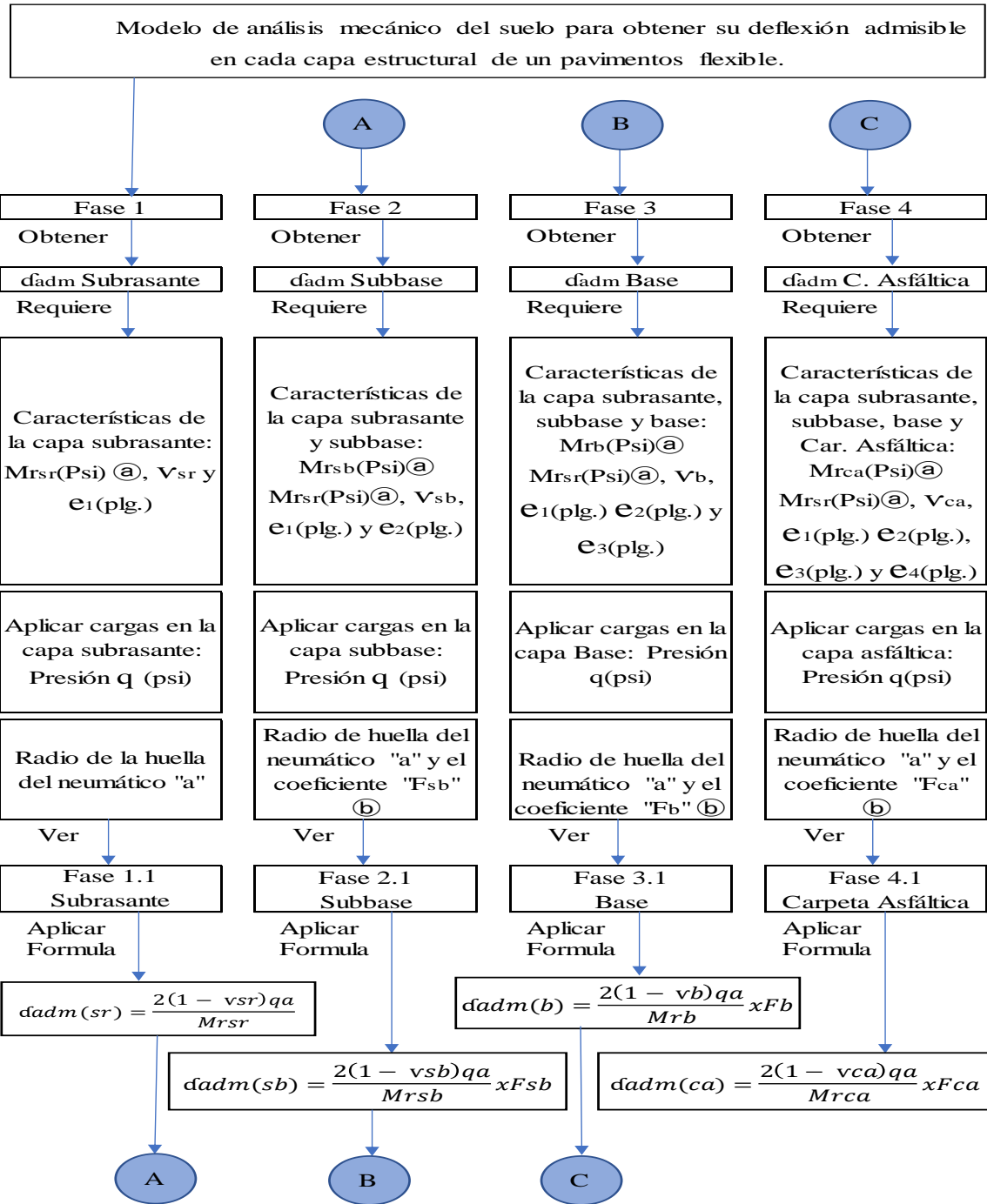
$$0.037 = \pi a^2$$

Radio del área cargada: $a = 0.108 \text{ m.}$

Conociendo las características de los suelos y aplicación de cargas, en el siguiente mapa conceptual se muestra un modelo de análisis mecánico del suelo para obtener su deflexión admisible en cada capa estructural de un pavimento flexible.

Para este modelo se tomó en consideración la teoría de Boussinesq.

La capa asfáltica se desarrolló con fines comparativos para el análisis de resultados.



Abreviaturas:

ɔadm: Deflexión admisible	Mr: Módulo resiliente	v: Poisson
sr: Subrasante	sb: Subbase	b: Base
q: Presión	a: Radio	e1: Espesor 1
e2: Espesor 2	e3: Espesor 3	Fsb: Factor Subbase
Fsb: Factor Carpeta asfáltica	Fsb: Factor base	

Nota:

(a) Los módulos resiliente $M_{sr}, M_{sb}, M_{rb}, M_{rc}$ se obtienen mediante el CBR del material de acuerdo a los ensayos de cada suelo.

(b) Para calcular los Factor F_{sb}, F_b, F_{ca} usar graficos de coeficientes.

Figura 12: Mapa conceptual de un modelo de análisis mecánico del suelo
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestra graficas de las fases indicadas en el mapa conceptual

Fase 1.1 Subrasante

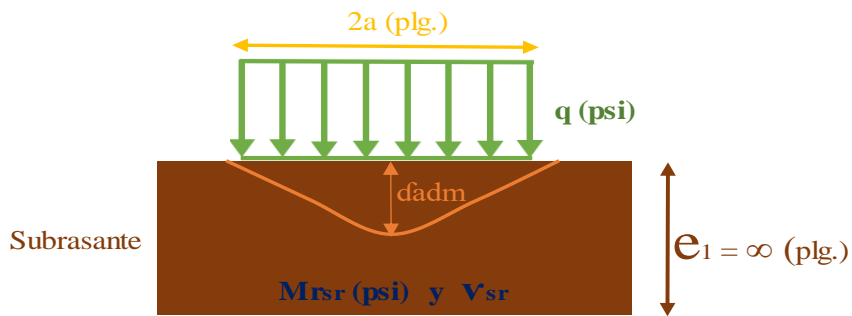


Figura 13: Fase 1.1 Subrasante
Fuente: Elaboración Propia

Fase 2.1 Subbase

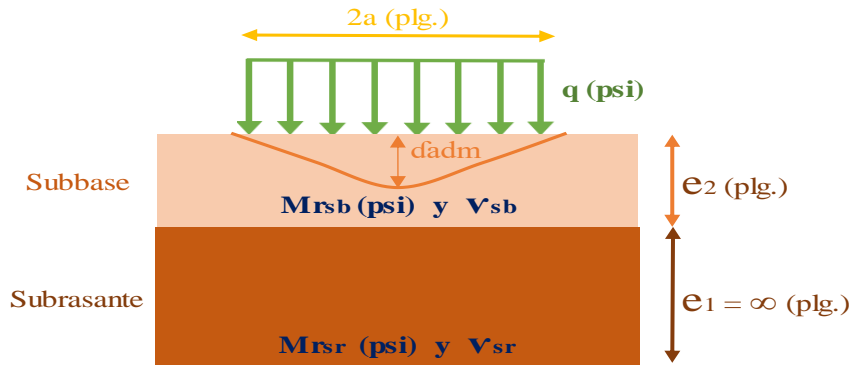


Figura 14: Fase 2.1 Subbase
Fuente: Elaboración Propia

Fase 3.1 Base

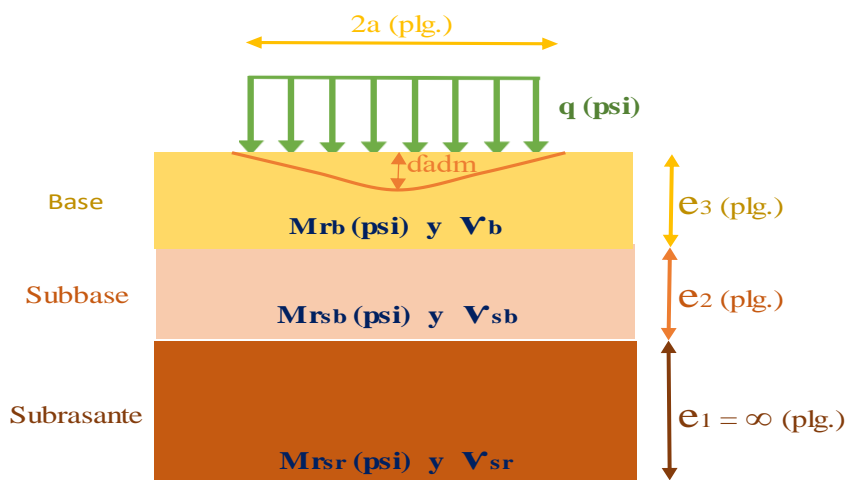


Figura 15: Fase 3.1 Base
Fuente: Elaboración Propia

Fase 4.1 Carpeta Asfáltica

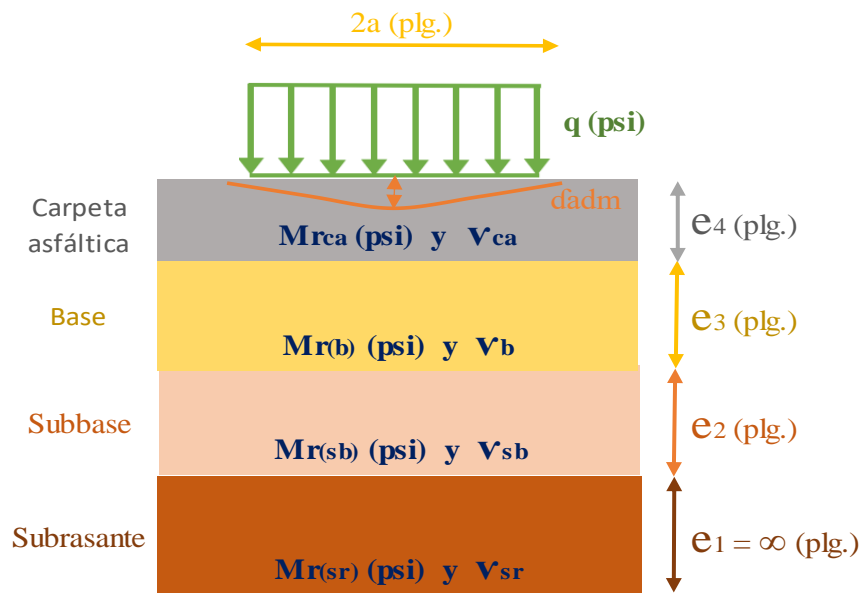


Figura 16: Fase 4.1 Carpeta asfáltica
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestran gráficos para encontrar coeficientes de factor de la capa subbase granular, base granular y carpeta asfáltica para 04 tipos de estructuras de pavimentos para cada capa estructural. Estos gráficos se desarrollaron, según las características de los materiales y aplicación de cargas normativas para los 04 tipos de estructuras de pavimentos.

El módulo resiliente de la subrasante, es obtenido mediante la siguiente formula $Mr(sr) = 2555 * CBR^{0.64}$.

Para encontrar este coeficiente de factor, ha sido realizado tomando en referencia los resultados obtenidos con el programa computacional Pitrapave.

Pavimento tipo 03

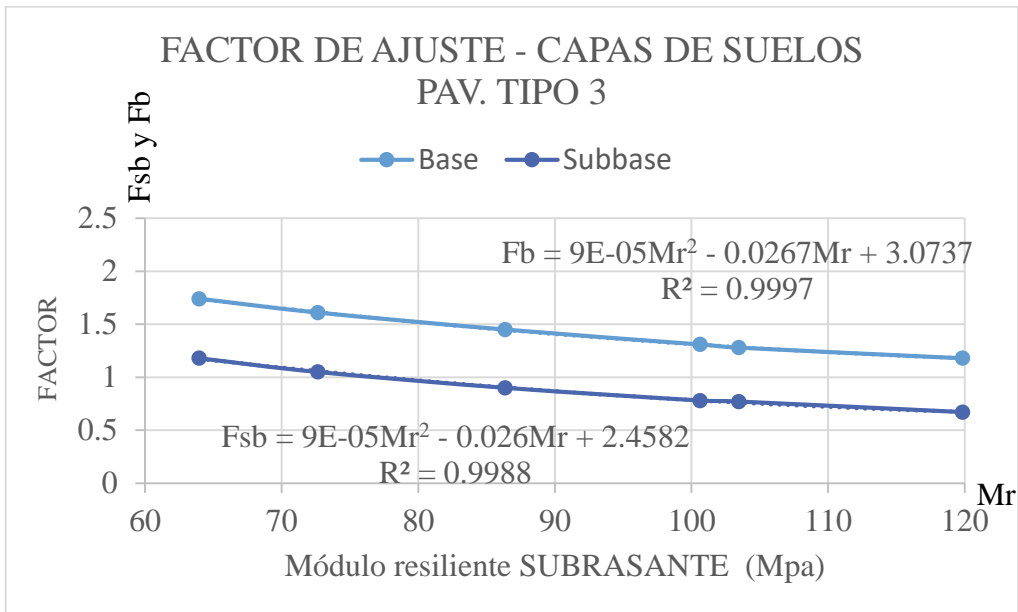


Figura 17: Gráfico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 03
Fuente: Elaboración Propia

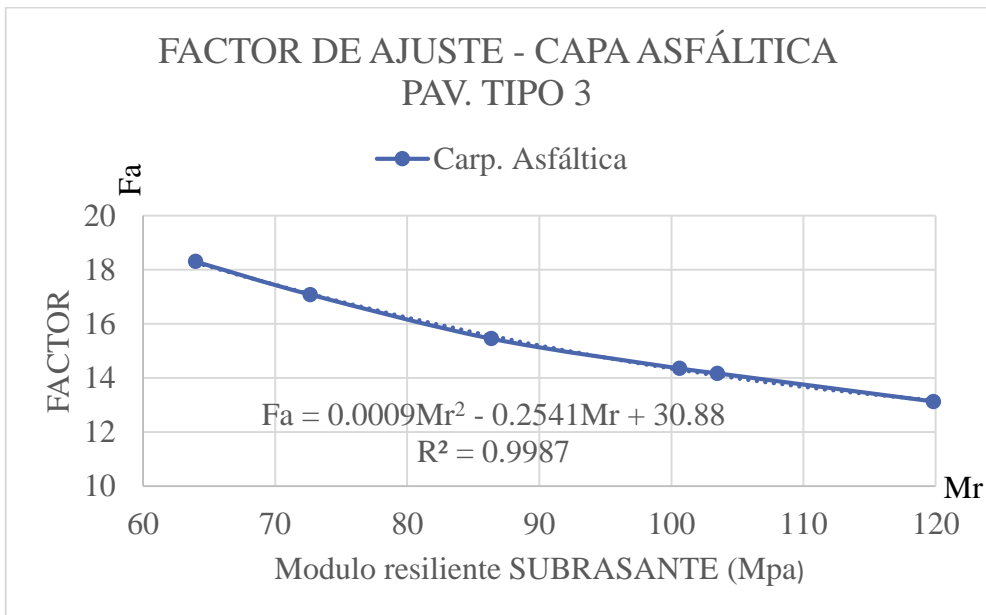


Figura 18: Gráfico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 03
Fuente: Elaboración Propia

Pavimento tipo 06

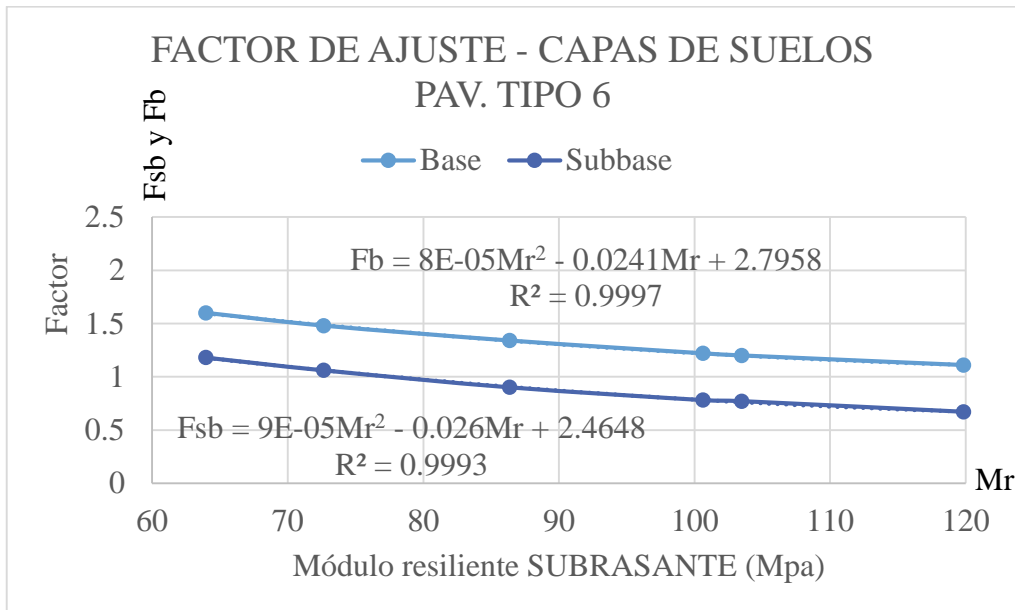


Figura 19: Grafico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 06

Fuente: Elaboración Propia

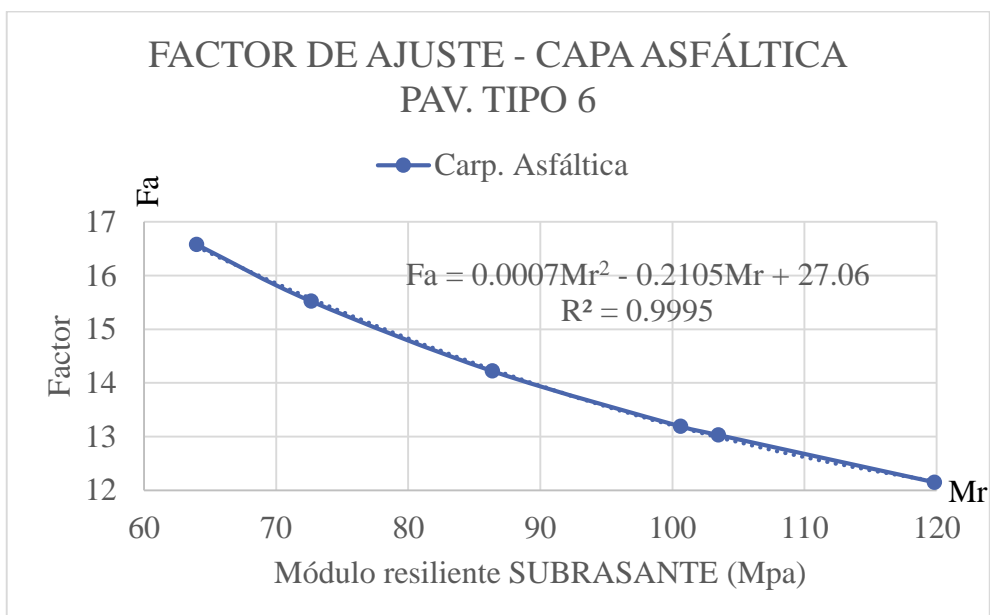


Figura 20: Grafico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 06

Fuente: Elaboración Propia

Pavimento tipo 13

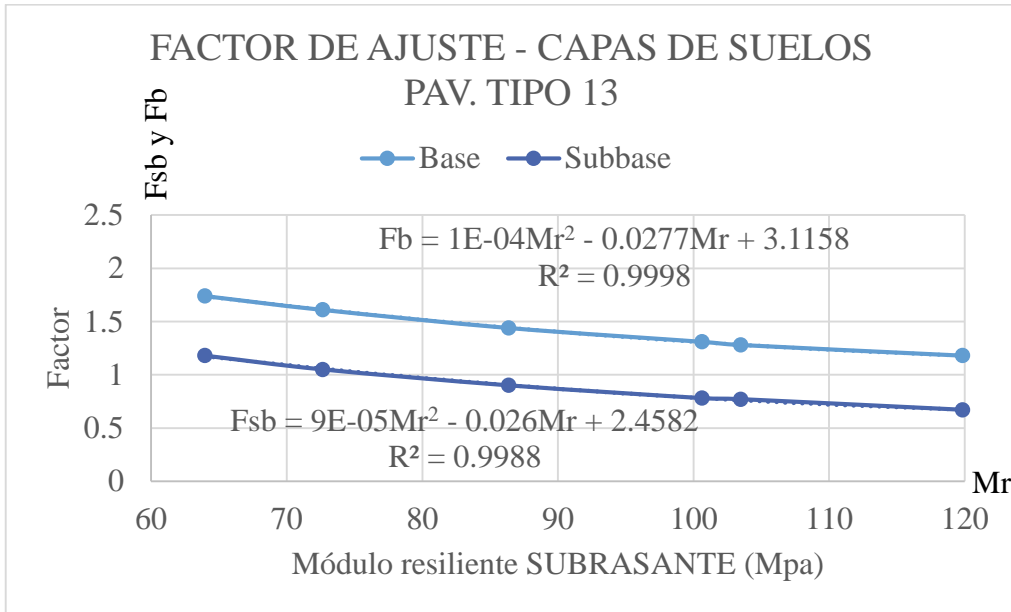


Figura 21: Grafico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 13

Fuente: Elaboración Propia

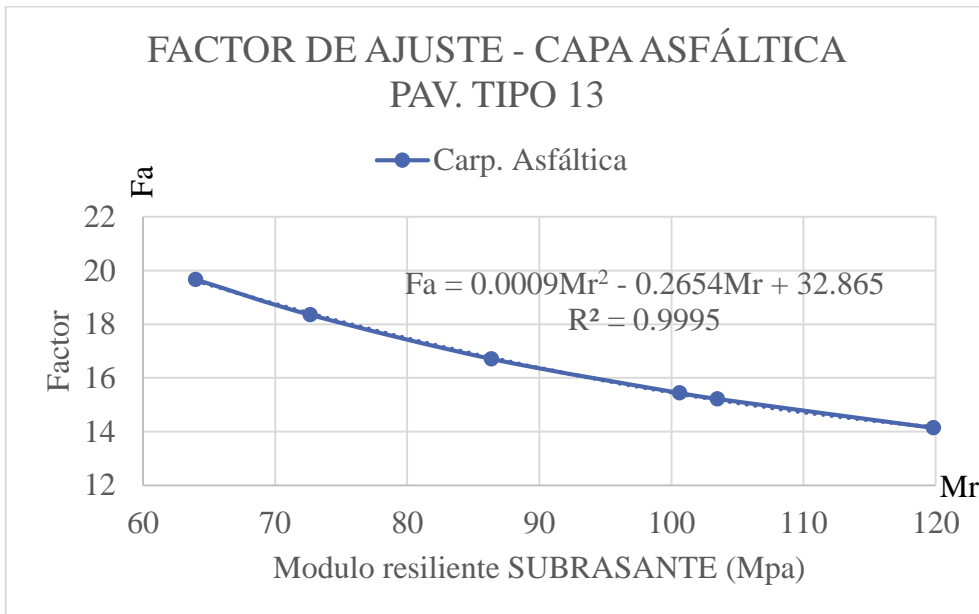


Figura 22: Grafico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 06

Fuente: Elaboración Propia

Pavimento tipo 29

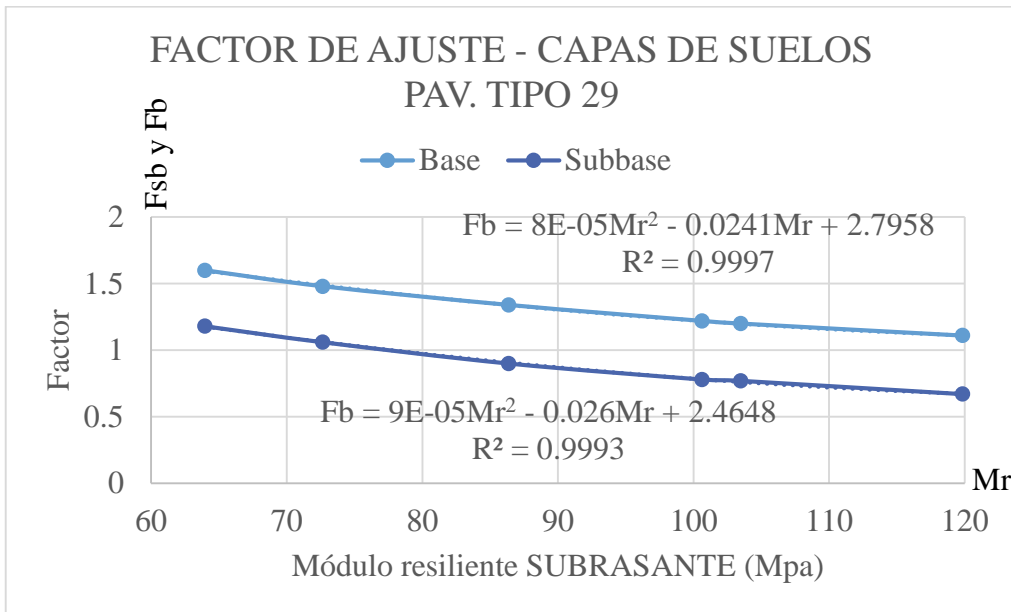


Figura 23: Gráfico de coeficiente del factor subbase y base para la estructura del pavimento tipo 29

Fuente: Elaboración Propia

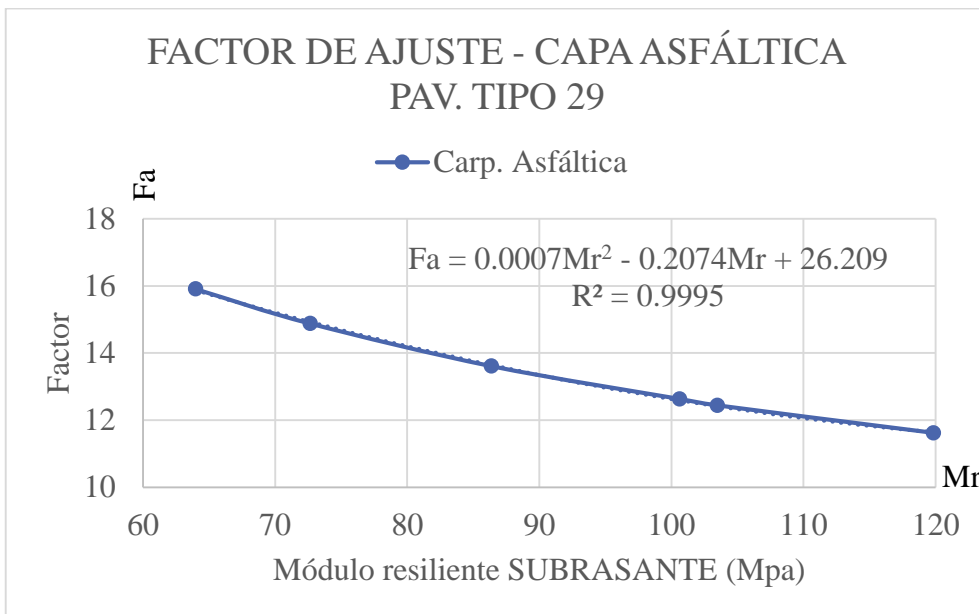


Figura 24: Gráfico de coeficiente del factor carpeta asfáltica para la estructura del pavimento tipo 06

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 19, se muestran los modelos de análisis mecánico del suelo para obtener su deflexión admisible en cada capa estructural de un pavimento flexible.

Tabla 19:
Modelos de análisis mecánico del suelo en cada capa estructural de 04 tipos de estructuras de pavimentos

Tipo de pavimento	Capa Estructural	Espesores (cm)	Modelos de análisis mecánico del suelo
Tipo 03	Asfáltica	7	$dadm(ca) = \frac{2(1 - vca)qa}{Mrca} x 13.13$
	Base (CBR= 100)	15	$dadm(b) = \frac{2(1 - vb)qa}{Mrb} x 1.18$
	Subbase (CBR= 40)	15	$dadm(sb) = \frac{2(1 - vsb)qa}{Mrsb} x 0.67$
	Subrasante (CBR= 20)	∞	$dadm(sr) = \frac{2(1 - vsr)qa}{Mrsr}$
Tipo 06	Asfáltica	8	$dadm(ca) = \frac{2(1 - vca)qa}{Mrca} x 13.03$
	Base (CBR= 100)	20	$dadm(b) = \frac{2(1 - vb)qa}{Mrb} x 1.20$
	Subbase (CBR= 40)	15	$dadm(sb) = \frac{2(1 - vsb)qa}{Mrsb} x 0.77$
	Subrasante (CBR= 15.9)	∞	$dadm(sr) = \frac{2(1 - vsr)qa}{Mrsr}$
Tipo 13	Asfáltica	5	$dadm(ca) = \frac{2(1 - vca)qa}{Mrca} x 16.71$
	Base (CBR= 100)	15	$dadm(b) = \frac{2(1 - vb)qa}{Mrb} x 1.44$
	Subbase (CBR= 40)	15	$dadm(sb) = \frac{2(1 - vsb)qa}{Mrsb} x 0.90$
	Subrasante (CBR= 12)	∞	$dadm(sr) = \frac{2(1 - vsr)qa}{Mrsr}$
Tipo 29	Asfáltica	9	$dadm(ca) = \frac{2(1 - vca)qa}{Mrca} x 12.63$
	Base (CBR= 100)	20	$dadm(b) = \frac{2(1 - vb)qa}{Mrb} x 1.22$
	Subbase (CBR= 40)	15	$dadm(sb) = \frac{2(1 - vsb)qa}{Mrsb} x 0.78$
	Subrasante (CBR= 15)	∞	$dadm(sr) = \frac{2(1 - vsr)qa}{Mrsr}$

Elaboración: Propia.

En la tabla 20, se muestra la variación de porcentaje entre los resultados obtenidos mediante un modelo de análisis mecánico del suelo y programa Pitrapave.

Tabla 20:

Variación en porcentaje de las deflexiones calculadas ($\times 10^{-2}$ mm) entre modelo de análisis mecánico del suelo y programa Pitrapave.

Capa	Tipo 3			Tipo 6			Tipo 13			Tipo 29		
	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
Calculado	49.6	50	-0.8	49.2	49	0.4	63.1	63	0.2	47.7	48	-0.6
Asfáltica	56.7	57	-0.5	58	58	0.0	69.3	69	0.0	58.9	59	-0.2
Base	58.8	59	-0.3	67.1	67	0.1	79	79	0.0	68.6	69	-0.6
Subbase	79	79	0.0	91	91	0.0	109.61	110	-0.4	94.1	94	0.1

Ⓐ Modelo de análisis mecánico del suelo

Ⓑ Programa Pitrapave

Ⓒ Variación en porcentaje entre Ⓐ y Ⓑ

Elaboración: Propia.

A continuación, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson “r”, que permite medir la fuerza y la dirección de una relación lineal entre variables. Este coeficiente “r” toma valores entre -1 y 1.

En la tabla 21, se muestra la medición de relación de variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson - pavimento tipo 03.

Tabla 21:

Medición de relación de variables – pavimento tipo 03.

Ensayo	CBR	dadm subrasante	CBR	dadm subbase	CBR	dadm base
1	7.5	148	7.5	104	7.5	84
2	9.15	130	9.15	92	9.15	77
3	11.90	110	11.90	79	11.90	70
4	15	94	15	69	15	63
5	16	91	16	67	16	62
6	20	79	20	59	20	57
Sumatoria	79.55	652.00	79.55	470.00	79.55	413.00
Media	13.26	108.67	13.26	78.33	13.26	68.83
desviación	4.24	23.84	4.24	15.47	4.24	9.30
Cuartil 1	9.84	91.75	9.84	67.50	9.84	62.25
Cuartil 2	13.45	102	13.45	74	12.68	66.5
Cuartil 3	15.75	125	15.75	88.75	13.69	75.25
Curtosis		-1.62		-1.67		-2.02
varianza		-98.32		-63.75		-38.52

Coefficiente de correlación de Pearson "r"	-0.97	-0.97	-0.98
--	-------	-------	-------

Elaboración: Propia.

En la tabla 22, se muestra la medición de relación de variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson - pavimento tipo 06

Tabla 22:

Medición de relación de variables – pavimento tipo 06.

Ensayo	CBR	dadm subrasante	CBR	dadm subbase	CBR	dadm base
1	7.50	148	7.5	104	7.5	77
2	9.15	130	9.15	92	9.15	72
3	11.90	110	11.90	79	11.90	64
4	15	94	15	69	15	59
5	16	91	16	67	16	58
6	20	79	20	59	20	53
Sumatoria	79.55	652.00	79.55	470.00	79.55	383.00
Media	13.26	108.67	13.26	78.33	13.26	63.83
desviación	4.24	23.84	4.24	15.47	4.24	8.31
Cuartil 1	9.84	91.75	9.84	67.50	9.84	58.25
Cuartil 2	12.68	102	13.45	74	13.45	61.5
Cuartil 3	13.69	125	15.75	88.75	15.75	70
Curtosis	-1.62		-1.67		-2.02	
varianza	-98.32		-63.75		-34.51	
Coefficiente de correlación de Pearson "r"	-0.97		-0.97		-0.98	

Elaboración: Propia.

En la tabla 23, se muestra la medición de relación de variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson - pavimento tipo 13.

Tabla 23:

Medición de relación de variables – pavimento tipo 13.

Ensayo	CBR	dadm subrasante	CBR	dadm subbase	CBR	dadm base
1	7.50	148	7.5	104	7.5	84
2	9.15	130	9.15	92	9.15	77
3	11.90	110	11.90	79	11.90	69.3

4	15	94	15	69	15	63
5	16	91	16	67	16	61.9
6	20	79	20	59	20	57
Sumatoria	79.55	652.00	79.55	470.00	79.55	412.20
Media	13.26	108.67	13.26	78.33	13.26	68.70
desviación	4.24	23.84	4.24	15.47	4.24	9.30
Cuartil 1	9.84	91.75	9.84	67.50	9.84	62.18
Cuartil 2	13.45	102	13.45	74	13.45	66.15
Cuartil 3	15.75	125	15.75	88.75	15.75	75.075
Curtosis		-1.62		-1.67		-2.01
varianza		-98.32		-63.75		-38.41
Coefficiente de correlación de Pearson "r"		-0.97		-0.97		-0.97

Elaboración: Propia.

En la tabla 24, se muestra la medición de relación de variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson - pavimento tipo 29.

Tabla 24:

Medición de relación de variables – pavimento tipo 29.

Ensayo	CBR	dadm subrasante	CBR	dadm subbase	CBR	dadm base
1	7.50	148	7.5	104	7.5	77
2	9.15	130	9.15	93	9.15	72
3	11.90	110	11.90	79	11.90	64
4	15	94	15	69	15	59
5	16	91	16	67	16	58
6	20	79	20	59	20	53
Sumatoria	79.55	652.00	79.55	471.00	79.55	383.00
Media	13.26	108.67	13.26	78.50	13.26	63.83
desviación	4.24	23.84	4.24	15.62	4.24	8.31
Cuartil 1	9.84	91.75	9.84	67.50	9.84	58.25
Cuartil 2	13.45	102	13.45	74	13.45	61.5
Cuartil 3	15.75	125	15.75	89.5	15.75	70
Curtosis		-1.62		-1.67		-2.02
varianza		-98.32		-64.44		-34.51
Coefficiente de correlación de Pearson "r"		-0.97		-0.97		-0.98

Elaboración: Propia.

Al calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables por cada capa de suelo de los 04 tipos de pavimentos se obtiene coeficientes de Pearson “r” entre - 0.97 y - 0.98, siendo esta una relación inversa y de correlación fuerte.

3.4.2 Trabajos durante la construcción de un pavimento flexible

Para corroborar el cumplimiento de los materiales a usar, según los parámetros mínimos aceptables por las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC, se realizó ensayos a los materiales en cada capa del suelo para los 04 tipos de pavimentos. En la imagen 20, se muestra la extracción de muestra de la capa subrasante para realizar ensayos en laboratorio.



Figura 25: Obra IVD el Derby, Extracción de muestras para realización de ensayos.
Fuente: Propia.

Al término de la conformación de las capas subrasante, subbase y base, uno de los ensayos en campo para verificar su capacidad de soporte de la capa estructural es la deflexión, el cual, se realizó mediante equipos Viga Benkelman y Light Falling Weight Deflectometer, las cuales, proporcionan datos de campo, luego son procesadas para obtener un modelo matemático y calcular el valor de la deflexión en el punto ensayado.

Recolección de datos con el equipo Viga Benkelman

En la imagen 26, se muestra la recolección de datos, en un punto de ensayo, en una capa de suelo haciendo uso del equipo Viga Benkelman.



Figura 26: Ensayos en campo con el equipo Viga Benkelman en una capa conformada.
Fuente: Propia.

Los ensayos de campo, se realizaron según el manual de ensayos de materiales del MTC (2016) - MTC E 1006 – “Medidas de deflexión de un pavimento empleando Viga Benkelman”.

Recolección de datos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer

En la imagen 27, se muestra la recolección de datos, en un punto de ensayo de una capa de suelo, haciendo uso de un equipo Light Falling Weight Deflectometer.



Figura 27: Ensayo en campo con el equipo Light Falling Weight Deflectometer en una capa conformada.
Fuente: Elaboración propia.

En la imagen 28, se muestra la realización del ensayo con el equipo LWD, a diferentes aplicaciones de carga sobre una capa conformada.



Figura 28: Ensayos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer a diferentes aplicaciones de carga en una capa conformada.

Fuente: Propia.

El equipo Light Falling Weight deflectometer, proporciona datos de deflexión y módulo resiliente con una carga máxima de 9KN, por lo tanto, los datos recolectados tienen limitación de carga por lo que se determinó un modelo matemático de deformación del suelo para obtener resultados a una proyección de carga de 41 KN.

El equipo LWD, se sincroniza con un PAD, donde recolecta la información de la deflexión y módulo resiliente en una extensión fw2 cada vez que se aplican cargas al suelo.

3.4.3 Procesamiento de datos y cálculos en gabinete

Procesamiento de datos y cálculos con el equipo Viga Benkelman

El procesamiento y cálculo de deflexión de campo, ha sido calculado según el manual de ensayos de materiales del MTC (2016) - MTC E 1006 – “Medidas de deflexión de un pavimento empleando Viga Benkelman”.

El cálculo del valor de la deflexión de campo, a través del equipo Viga Benkelman, es el valor patrón, comparado con los valores a través de una representación gráfica obtenida con las datas de campo con el equipo LWD.

Procesamiento de datos y cálculos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer

Deflexión

Debido a la limitación de carga por el equipo LWD, se propuso un modelo matemático de deformación del suelo, con la finalidad de obtener la deflexión de campo en cada capa estructural del suelo de un pavimento flexible.

Para el procesamiento de datos y cálculos se desarrollará como ejemplar una capa de subbase del pavimento tipo 06, las demás capas de suelos, de los 04 tipos de pavimentos tienen el mismo proceso y cálculo, pero brinda diferentes modelos matemáticos de deformación del suelo, debido al indicador de las características del suelo y aplicación de cargas.

De la capa subbase del pavimento tipo 06, se realizó 28 puntos de ensayos, cada punto de ensayo proporciona su deflexión y su módulo resiliente a diferentes aplicaciones de carga, los datos de campo se encuentran en una extensión. fw2, la cual, se exportó a una hoja de excel, donde muestra los datos obtenidos en campo.

En la figura 29. se muestra un formato donde se exportó los datos de deflexión y módulo resiliente.


Client name:	RDL	Project no.:	1	Import FW2 file					
Client reference:	GRANVIL	Date:	18/09/2019	The application is provided without any warranty or guarantee by Grontmij					
Point No.	Drop No.	E0 (Mpa)	Deflec (µm)	Force (kN)	Description	Remarks	Longitude	Latitude	Chainage
1	0								
1	1	369	29	3.0	vacp sub base (tf c3 li		76°58'45.35"V	12°5'52.04"S	1+0060
1	2	381	25	2.7					
1	3	388	23	2.5					
1	4	355	35	3.5					
1	5	357	35	3.5					
1	6	359	34	3.4					
1	7	336	48	4.5					
1	8	333	48	4.5					
1	9	335	48	4.6					
1	10	327	55	5.1					
1	11	330	53	4.9					
1	12	338	49	4.7					
1	13	295	85	7.0					
1	14	299	82	6.8					

Figura 29: Formato de exportación de datos de deflexión y módulos resiliente.
Fuente: Elaboración propia.

Se ordenó la data, de cada punto de ensayo por carga aplicadas y deflexión, cuya carga limite es de 9 KN, posteriormente se verifico que, una ecuación cuadrática matemática con proyección de carga a 41KN, obtiene valores de deflexión similares a la deflexión del valor patrón.

Se utilizó la proyección de la ecuación cuadrática, para cada punto de ensayo de la superficie de la capa de suelo, por lo que se obtuvo 28 ecuaciones cuadráticas.

En la figura 30, se muestra los datos ordenados de, la deflexión a diferentes cargas de aplicación de cargas para 01 punto de ensayo, al utilizar estos datos se proyectó a una carga de 41 KN con una ecuación cuadrática, debido que brinda resultados de deflexión parecidos al resultado patrón.

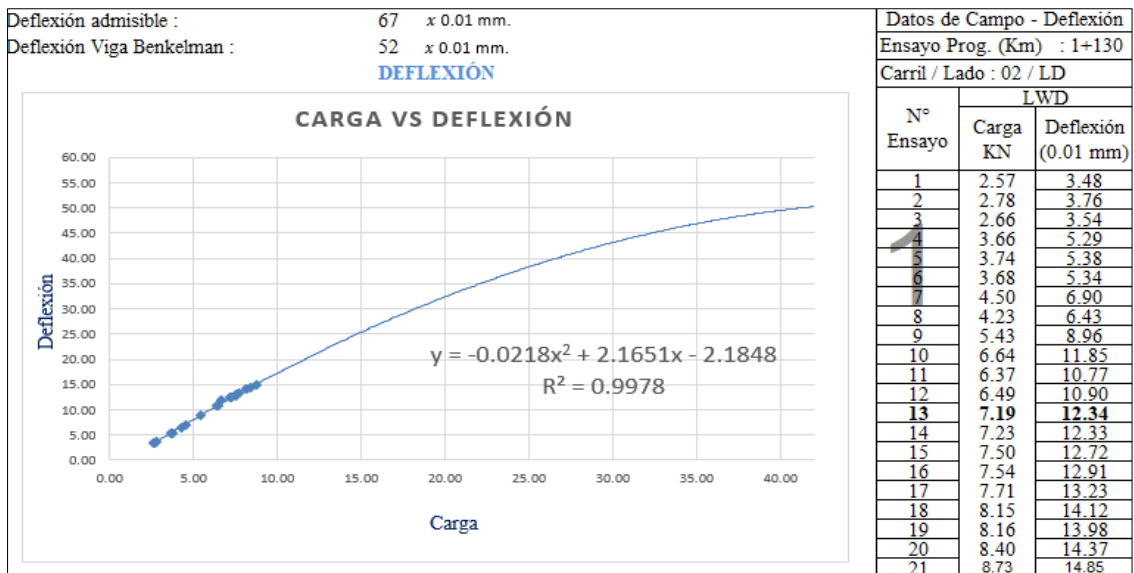


Figura 30: Ecuación cuadrática para 01 punto de ensayo en la capa subbase del pavimento tipo 06.
Fuente: Propia.

En la tabla 25, se muestra los resultados de deflexión haciendo uso de la ecuación cuadrática para los 28 puntos de ensayados. También se muestra los resultados de deflexión haciendo uso con el equipo Viga Benkelman, esta para obtener un muestreo representativo y una ecuación cuadrática general.

Tabla 25:
Resultados de deflexión

Muestra	Carril	Progresiva	d ^f VB (0.01 mm)	d ^f LWD (0.01 mm)
1	Carril 2/ LD	0+985	63	85
2	Carril 2/ LI	0+985	51	90
3	Carril 1/ LD	1+010	64	54
4	Carril 2/ LD	1+035	60	60
5	Carril 2/ LI	1+055	67	160
6	Carril 3/ LI	1+060	55	71
7	Carril 3/ LI	1+060	39	150
8	Carril 2/ LD	1+080	55	145
9	Carril 3/ LD	1+084	51	115
10	Carril 3/ LI	1+125	32	73
11	Carril 3/ LI	1+110	63	82
12	Carril 3/ LD	1+130	52	50
13	Carril 3/ LD	1+135	43	55
14	Carril 3/ LI	1+160	55	35
15	Carril 2/ LD	1+180	45	215
16	Carril 2 / LD	1+180	44	76
17	Carril 3 / LD	1+185	39	85
18	Carril 2 / LI	1+205	47	270
19	Carril 1 / LD	1+205	55	85
20	Carril 1 / LD	1+205	55	77
21	Carril 1 / LI	1+205	35	115
22	Carril 3 / LI	1+210	59	47
23	Carril 2 / LD	1+230	45	95
24	Carril 1 / LI	1+230	54	55
25	Carril 3 / LD	1+235	58	75
26	Carril 3 / LI	1+235	55	63
27	Carril 3 / LD	1+255	57	72
28	Carril 3 / LI	1+255	47	67
Cantidad			28	28
Suma			1445	2622
Promedio			51.61	93.64
Desviación estándar			8.95	52.54
Coeficiente de variación (%)			17.33	56.11

Elaboración: Propia.

En la figura 31, se muestra la desviación estándar superior e inferior de los resultados obtenidos con el equipo Viga Bekelman, el cual, delimita las muestras de resultados representativos con el equipo LWD.

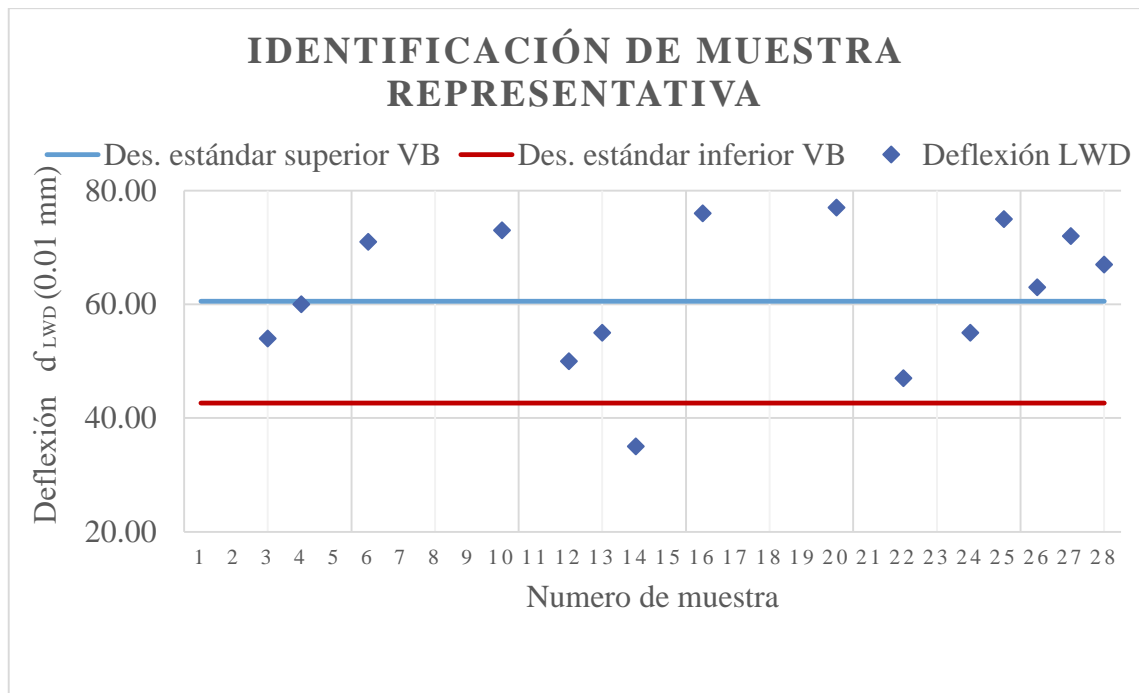


Figura 31: Identificación de muestras representativas de deflexión.
Fuente: Propia.

Identificado 06 muestras representativa, se promedió para obtener la ecuación cuadrática general, para la capa subbase del pavimento tipo 06. En la tabla 26, se muestra ecuación cuadrática promedio de las 06 muestras representativas.

Tabla 26:
Ecuación cuadrática promedio de 06 muestras representativas

Muestra	Muestra representativa		Ecuación cuadrática		
	Carril	Progresiva	c ²	c	Adimensional
3	Carril 1/ LD	1+010	-0.0326	2.6963	-1.4714
4	Carril 2/ LD	1+035	-0.0384	3.0661	-0.8338
12	Carril 3/ LD	1+130	-0.0218	2.1651	-2.1848
13	Carril 3/ LD	1+135	-0.0051	1.8038	-3.5679
22	Carril 3 / LI	1+210	-0.0202	2.002	-1.2493
24	Carril 1 / LI	1+230	-0.0161	2.0706	-2.3509
Promedio de la Ecuación cuadrática			-0.0224	2.3007	-1.9430
Ecuación cuadrática			dn = -0.0224 C² + 2.3007 C - 1.9430		

Elaboración: Propia

Esta ecuación cuadrática promedio, permite obtener cualquier deflexión sometida a una carga de hasta 41 KN.

En la figura 32, se muestra la representación gráfica de la ecuación exponencial promedio.

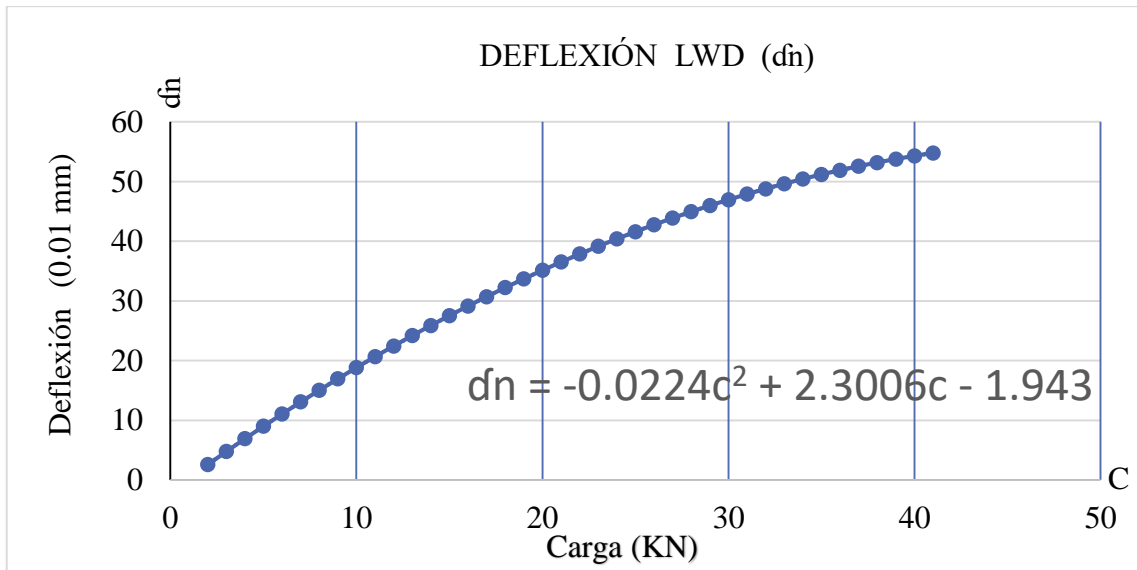


Figura 32: Ecuación cuadrática general.
Fuente: Propia.

Con esta ecuación cuadrática general, se logra obtener deflexiones por unidad de carga, en la tabla 27, se muestra la deflexión por unidad de carga, como también un factor de proyección de 41 KN por cada unidad de carga.

Tabla 27:

Factor por unidad de carga para 41 KN.

Carga (C) KN	Deflexión (d_n) LWD 0.01 mm.	Incremento de deflexión $\Delta d = d_{n+1} - d_n$	Factor "F _{41KN} " para 41 KN $F_{41KN} = d_{n+1} / d_n$
2.00	2.57	2.57	21.33
3.00	4.76	2.19	11.52
4.00	6.90	2.14	7.94
5.00	9.00	2.10	6.09
6.00	11.06	2.05	4.96
7.00	13.07	2.01	4.19
8.00	15.03	1.97	3.64
9.00	16.95	1.92	3.23
10.00	18.83	1.88	2.91
11.00	20.66	1.83	2.65
12.00	22.44	1.79	2.44
13.00	24.19	1.74	2.27
14.00	25.88	1.70	2.12
15.00	27.53	1.65	1.99
16.00	29.14	1.61	1.88
17.00	30.70	1.56	1.78
18.00	32.22	1.52	1.70
19.00	33.69	1.47	1.63
20.00	35.12	1.43	1.56

21.00	36.51	1.38	1.50
22.00	37.85	1.34	1.45
23.00	39.14	1.29	1.40
24.00	40.39	1.25	1.36
25.00	41.59	1.20	1.32
26.00	42.75	1.16	1.28
27.00	43.87	1.12	1.25
28.00	44.94	1.07	1.22
29.00	45.97	1.03	1.19
30.00	46.95	0.98	1.17
31.00	47.88	0.94	1.14
32.00	48.77	0.89	1.12
33.00	49.62	0.85	1.10
34.00	50.42	0.80	1.09
35.00	51.18	0.76	1.07
36.00	51.89	0.71	1.06
37.00	52.56	0.67	1.04
38.00	53.18	0.62	1.03
39.00	53.76	0.58	1.02
40.00	54.30	0.53	1.01
41.00	54.79	0.49	1.00

Elaboración: Propia

Realizando una gráfica entre unidad de carga y factor "F" se obtiene una ecuación exponencial, para obtener el factor "F" en función de la carga.

En la figura 23, se muestra el factor F, representado por una ecuación exponencial.

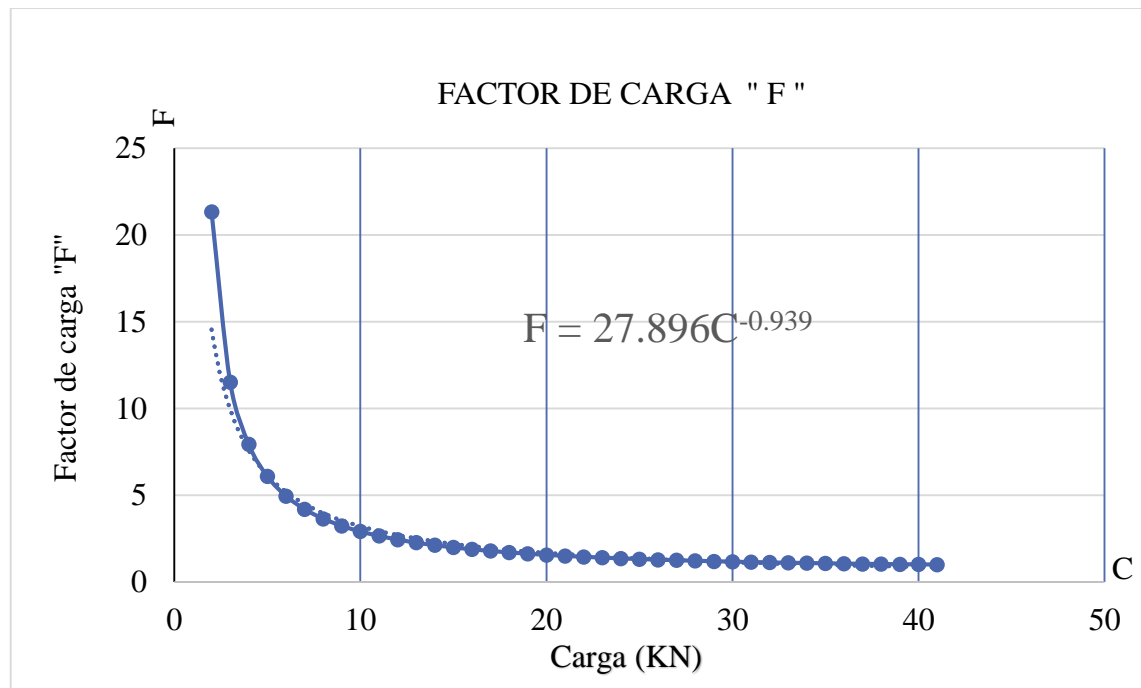


Figura 33: Representación gráfica del Factor F.

Fuente: Propia.

El modelo matemático de deformación del suelo, resulta de la siguiente manera:

$$\Delta d = d_p - d_n \dots (\text{ecuación 1})$$

$$\Delta d = C \times S \times d_n \dots (\text{ecuación 2})$$

$$d_p - d_n = C \times S \times d_n \dots (\text{igualando ecuación 1 y 2})$$

$$d_p = (C \times S \times d_n) + d_n$$

$$d_p = d_n (C \times S + 1)$$

dónde: $C \times S + 1$, es el factor "F" de crecimiento de deflexión por unidad de carga

$$d_p = d_n \times F \dots (F, \text{factor de crecimiento de deflexión por unidad de carga})$$

Reemplazando los valores a través de una representación gráfica obtenida, se tiene:

$$d_p = d_n * 27.896C^{-0.939}$$

$$d_p = d_n * kC^{k_1}$$

Donde:

d_p : Deflexión proyectada a 41KN a calcular

d_n : Deflexión obtenida en campo mediante el equipo LWD

C: Carga obtenida en campo mediante el equipo LWD

k y k_1 : Constante de crecimiento por características del suelo y aplicación de carga.

En la tabla 28, se muestran los valores de constantes k y k_1 , del modelo matemático de deformación del suelo, para 04 tipos de estructuras de pavimentos.

Tabla 28:

Constantes k y k_1 en un modelo matemático de deformación del suelo para diferentes tipos de pavimentos.

Pavimento	Capa	Constantes de deflexión	
		k	k_1
Tipo 3	Base	26.65	-0.90
	Subbase	13.48	-0.72
	Subrasante	10.33	-0.66
Tipo 6	Base	49.58	-1.05
	Subbase	27.90	-0.94
	Subrasante	41.26	-1.08
Tipo 13	Base	25.45	-0.92
	Subbase	12.55	-0.73
	Subrasante	9.67	-0.60
Tipo 29	Base	29.76	-1.00
	Subbase	15.02	-0.78
	Subrasante	11.44	-0.58

Elaboración: Propia

Haciendo uso de un modelo matemático de deformación del suelo se obtiene el valor de la deflexión, para los 28 puntos de ensayos realizados en la capa de subbase del pavimento tipo 6, con la data suministrada por el equipo LWD.

Con los resultados de deflexión, haciendo uso de los datos proporcionados por el equipo Viga Benkelman, en la tabla 29, se verifica la diferencia de resultados con el obtenido mediante el modelo matemático de deformación del suelo, utilizando los datos de campo haciendo uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer, está en capa subbase del pavimento tipo 06.

Tabla 29:

Variación en porcentaje de deflexiones en capa subbase del pavimento tipo 06

Muestra	DATOS DE CAMPO ©			CÁLCULOS ④		Diferencia entre VB y LWD en %		
	①	②	(Deflexión en μm)	(Deflexión en 0.01 mm)	Carga en KN		Factor	(Deflexión en 0.01 mm)
M	d _{adm}	d _{VB}	d _n	d _n	C	F _{41 KN}	d _{LWD}	%
1	67	63	114.79	11.48	5.71	5.43	62.37	-1.00
2	67	51	101.40	10.14	6.53	4.79	48.57	-4.76
3	67	64	94.93	9.49	4.33	7.04	66.88	4.50
4	67	60	111.76	11.18	5.37	5.76	64.33	7.21
5	67	67	124.20	12.42	6.16	5.06	62.84	-6.21
6	67	55	128.47	12.85	7.12	4.42	56.74	3.16
7	67	39	96.24	9.62	7.51	4.20	40.43	3.66
8	67	55	123.75	12.38	7.68	4.11	50.90	-7.45
9	67	51	120.11	12.01	7.33	4.30	51.62	1.21
10	67	32	74.00	7.40	7.78	4.06	30.07	-6.03
11	67	63	111.00	11.10	5.28	5.85	64.91	3.03
12	67	52	123.40	12.34	7.19	4.38	54.00	3.84
13	67	43	96.94	9.69	7.49	4.21	40.82	-5.06
14	67	55	117.74	11.77	7.12	4.42	52.00	-5.46
15	67	45	116.15	11.62	7.58	4.16	48.37	7.48
16	67	44	81.38	8.14	5.41	5.72	46.51	5.71
17	67	39	82.00	8.20	7.00	4.49	36.80	-5.65
18	67	47	108.14	10.81	7.18	4.38	47.38	0.82
19	67	55	134.00	13.40	7.48	4.22	56.50	2.73
20	67	55	128.58	12.86	7.34	4.29	55.19	0.34
21	67	35	77.00	7.70	6.92	4.54	34.93	-0.21
22	67	59	117.00	11.70	6.70	4.68	54.71	-7.28

23	67	45	108.00	10.80	7.50	4.21	45.42	0.94
24	67	54	125.00	12.50	7.58	4.16	52.05	-3.61
25	67	58	148.00	14.80	7.58	4.16	61.63	6.26
26	67	55	129.00	12.90	7.34	4.29	55.37	0.67
27	67	57	123.00	12.30	7.20	4.37	53.75	-5.69
28	67	47	101.00	10.10	7.00	4.49	45.32	-3.57

Ⓐ Deflexión admisible en 0.01 mm. calculado a través de un modelo de análisis mecánico del suelo.

Ⓑ Deflexión de campo en 0.01 mm. calculados según manual de ensayos de materiales del MTC (2016) - MTC E 1006 - Medidas de deflexión de un pavimento empleando Viga Benkelman.

Ⓒ Datos de deflexión en campo haciendo uso del equipo Leight Weight Deflectometer.

Ⓓ Deflexión de campo calculado a través de un modelo matemático de deformación del suelo.

Elaboración: Propia

A continuación, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson “r”. En la tabla 30, se muestra la medición de relación de variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson para la capa de subbase del pavimento tipo 06.

Tabla 30:

Medición de relación de variables en capa subbase del pavimento tipo 06 - deflexión

Ensayo	Carga KN	d' 0.01mm	Ensayo	Carga KN	d' 0.01mm	Ensayo	Carga KN	d' 0.01mm
1	2.66	5.51	28.00	6.64	11.85	55.00	6.38	8.11
2	2.37	4.84	29.00	6.37	10.77	56.00	6.68	8.53
3	4.47	9.89	30.00	6.49	10.90	57.00	8.09	10.45
4	4.33	9.49	31.00	7.19	12.34	58.00	7.49	9.69
5	5.29	11.73	32.00	7.23	12.33	59.00	7.30	9.23
6	5.46	12.07	33.00	7.50	12.72	60.00	7.80	10.06
7	7.20	16.91	34.00	7.54	12.91	61.00	2.86	4.39
8	7.20	16.12	35.00	7.71	13.23	62.00	3.79	5.90
9	8.35	18.91	36.00	8.15	14.12	63.00	5.56	9.20
10	9.02	19.89	37.00	8.16	13.98	64.00	6.70	11.66
11	2.68	7.14	38.00	8.40	14.37	65.00	7.53	12.73
12	2.67	7.11	39.00	8.73	14.85	66.00	7.55	12.48
13	2.66	7.08	40.00	2.78	1.77	67.00	8.30	13.75
14	4.48	12.06	41.00	2.94	1.84	68.00	9.18	15.57
15	5.37	14.18	42.00	3.09	1.72	69.00	2.88	3.57
16	7.31	20.64	43.00	3.61	2.76	70.00	3.03	3.80
17	7.25	18.96	44.00	3.63	2.64	71.00	4.24	6.03
18	8.32	21.63	45.00	3.62	2.69	72.00	4.30	6.14
19	2.57	3.48	46.00	3.75	3.34	73.00	5.28	8.10
20	2.78	3.76	47.00	5.45	6.58	74.00	6.88	11.34
21	2.66	3.54	48.00	5.16	5.60	75.00	6.88	11.34

22	3.66	5.29	49.00	5.16	5.14	76.00	6.77	10.84
23	3.74	5.38	50.00	6.24	7.21	77.00	7.58	12.49
24	3.68	5.34	51.00	6.38	8.02	78.00	7.61	12.22
25	4.50	6.90	52.00	6.27	7.10	79.00	8.99	15.14
26	4.23	6.43	53.00	6.65	8.81	80.00	9.16	15.10
27	5.43	8.96	54.00	6.42	7.36			
						Sumatoria	460.39	768.04
						Media	5.75	9.60
						Desviación	21.52	37.90
						Cuartil 1	3.75	5.82
						Cuartil 2	6.32	9.36
						Cuartil 3	7.49	12.55
						Varianza	788.27	
						Curtosis	0.98	
						Coefficiente de correlación de Pearson "r"	0.97	

Elaboración: Propia

Al calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables para la capa de subbase del pavimento tipo 06, se obtiene un coeficiente de Pearson "r" de 0.97, siendo esta una relación directa y de correlación fuerte.

Módulo resiliente

De la misma manera, que se ordenó los datos de campo de la deflexión admisible, se realizó con los datos del módulo resiliente, por cada punto de ensayo realizado en la capa de subbase del pavimento tipo 06.

Ordenada la data, por cada aplicación de carga, se tiene módulos resilientes, con carga límite de 9 KN, por lo que se verifico que una ecuación exponencial matemática con proyección de carga a 41KN, obtiene valor del módulo resiliente similar a los correlacionados mediante el ensayo del CBR del material utilizado en campo.

Esta ecuación exponencial, es utilizada para cada punto de ensayo de la superficie de la capa subbase del pavimento tipo 06, siendo 28 puntos de ensayos.

En la figura 34, se muestra los datos ordenados de módulo resiliente, a diferentes aplicaciones de cargas de hasta 9KN para 01 punto de ensayo, al utilizar estos datos se proyectó para una carga de 41 KN con una ecuación exponencial, ya que brinda resultados de módulos resilientes parecidos al del material ensayado en obra mediante la correlación de su CBR.

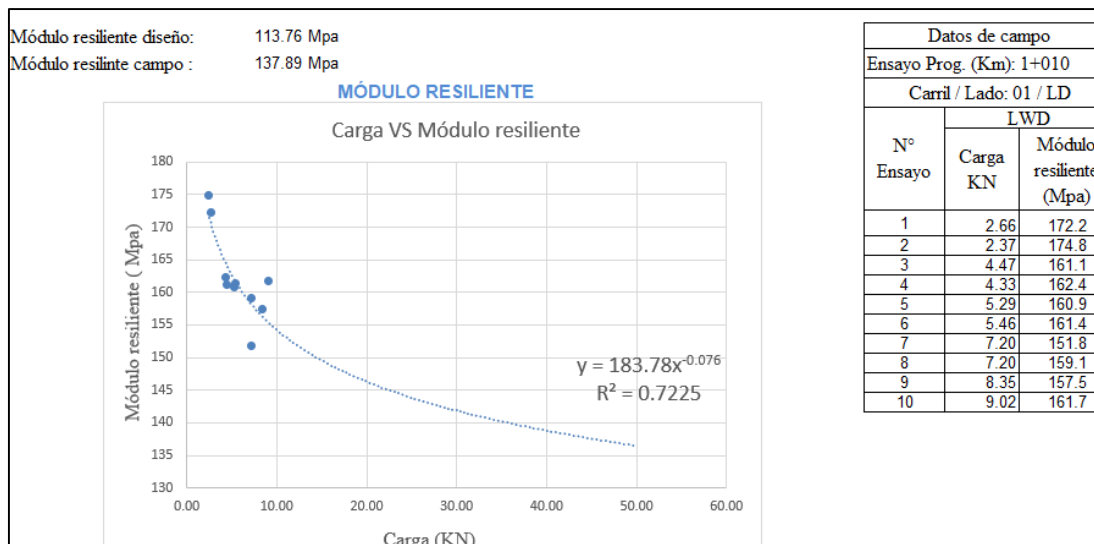


Figura 34: Ecuación exponencial para 01 punto de ensayo en la capa subbase del pavimento tipo 06.
Fuente: Propia.

Para los 28 puntos ensayados, se obtuvo 28 ecuaciones exponenciales, para obtener el valor del módulo resiliente con proyección a los 41 KN. A continuación, en la tabla 31, se muestra los resultados de módulos resilientes, haciendo uso de la ecuación potencial para cada punto de ensayo. Esta con el fin de obtener un muestreo representativo.

Tabla 31:
Resultados de módulos resilientes

Muestra	Carril	Progresiva	Mr diseño Mpa	Mr diseño Mpa	Mr LWD Mpa
1	Carril 2/ LD	0+985	113.76	137.89	138.59
2	Carril 2/ LI	0+985	113.76	137.89	97.47
3	Carril 1/ LD	1+010	113.76	137.89	138.59
4	Carril 2/ LD	1+035	113.76	137.89	122.71
5	Carril 2/ LI	1+055	113.76	137.89	124.56
6	Carril 3/ LI	1+060	113.76	137.89	181.23
7	Carril 3/ LI	1+060	113.76	137.89	166.61
8	Carril 2/ LD	1+080	113.76	137.89	140.13
9	Carril 3/ LD	1+084	113.76	137.89	97.72
10	Carril 3/ LI	1+125	113.76	137.89	79.56
11	Carril 3/ LI	1+110	113.76	137.89	125.39
12	Carril 3/ LD	1+130	113.76	137.89	141.75
13	Carril 3/ LD	1+135	113.76	137.89	72.15
14	Carril 3/ LI	1+160	113.76	137.89	122.27
15	Carril 2/ LD	1+180	113.76	137.89	84.07
16	Carril 2 / LD	1+180	113.76	137.89	107.02

17	Carril 3 / LD	1+185	113.76	137.89	181.06
18	Carril 2 / LI	1+205	113.76	137.89	122.92
19	Carril 1 / LD	1+205	113.76	137.89	139.67
20	Carril 1 / LD	1+205	113.76	137.89	107.02
21	Carril 1 / LI	1+205	113.76	137.89	114.14
22	Carril 3 / LI	1+210	113.76	137.89	182.59
23	Carril 2 / LD	1+230	113.76	137.89	166.82
24	Carril 1 / LI	1+230	113.76	137.89	139.08
25	Carril 3 / LD	1+235	113.76	137.89	130.95
26	Carril 3 / LI	1+235	113.76	137.89	111.41
27	Carril 3 / LD	1+255	113.76	137.89	167.94
28	Carril 3 / LI	1+255	113.76	137.89	207.51
Cantidad			28	28	28
Suma			3185.28	3860.92	3710.93
Promedio			113.76	137.89	132.53
Desviación estándar			0.00	0.00	33.61
Ceficiente de variación (%)			0.00	0.00	25.36

Elaboración: Propia.

En la figura 35, se muestra el resultado del módulo resiliente utilizados en el diseño estructural y lo obtenido en campo haciendo uso del valor del CBR del material, también se muestran los puntos de resultados de módulos resilientes realizados mediante la ecuación exponencial proyectado a 41 KN con datos del equipo LWD, esta con el fin de buscar una ecuación exponencial general.

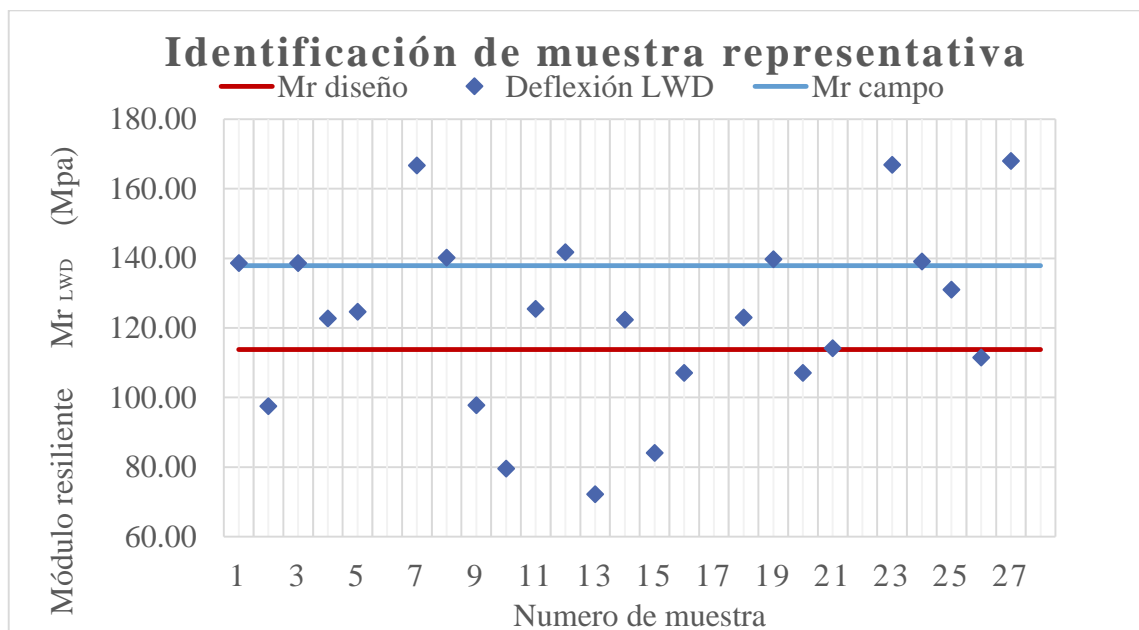


Figura 35: Identificación de muestras representativa de módulos resilientes.
Fuente: Propia.

Identificado la muestra representativa, se tomó el promedio de 06 ecuaciones exponenciales, para obtener la ecuación exponencial general para la capa subbase del pavimento tipo 06. En la tabla 32, se muestra ecuación exponencial promedio de las 06 muestras representativas.

Tabla 32:

Ecuación exponencial promedio de las 06 muestras representativas

Muestra	Muestra representativa		Ecuación exponencial	
	Carril	Progresiva	Adimensional	Exponencial
4	Carril 2/ LD	1+035	139.22	-0.34
5	Carril 2/ LI	1+055	241.25	-0.178
11	Carril 3/ LI	1+110	161.41	-0.068
14	Carril 3/ LI	1+160	512.67	-0.386
18	Carril 2 / LI	1+205	474.97	-0.364
25	Carril 3 / LD	1+235	208.3	-0.125
Promedio de la Ecuación exponencial			289.64	-0.24
Ecuación Exponencial			$Mr = 289.64 C^{-0.24}$	

Elaboración: Propia

En la gráfica 36, la representación gráfica de la ecuación exponencial promedio

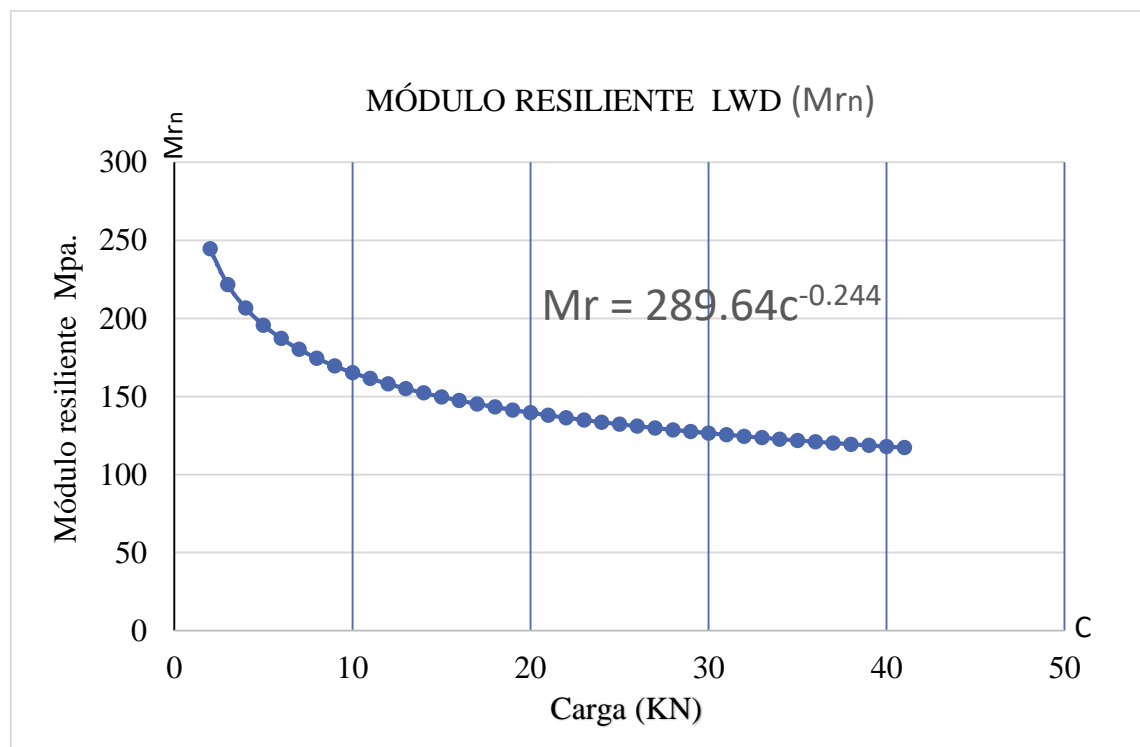


Figura 36: Ecuación exponencial general para obtener módulos resilientes.
Fuente: Propia.

Con esta ecuación exponencial general, se logra obtener módulos resilientes por unidad de carga, en la tabla 33, se muestra deflexiones por unidad de carga, como también un factor de proyección por cada unidad de carga para una proyección de 41 KN.

Tabla 33:

Factor por unidad de carga para 41 KN – módulo resiliente

Carga (c) KN	Módulo resiliente (Mrn) LWD Mpa.	Incremento Módulo resiliente $\Delta Mr = Mr_{n+1}$ - Mrn	Factor "F _{41KN} " para 41 KN $F_{41KN} = Mr_{n+1} /$ Mrn
2.00	244.65		0.48
3.00	221.65	-23.00	0.53
4.00	206.66	-15.00	0.57
5.00	195.73	-10.93	0.60
6.00	187.23	-8.50	0.63
7.00	180.33	-6.90	0.65
8.00	174.56	-5.77	0.67
9.00	169.63	-4.94	0.69
10.00	165.33	-4.30	0.71
11.00	161.54	-3.79	0.73
12.00	158.15	-3.39	0.74
13.00	155.10	-3.05	0.76
14.00	152.33	-2.77	0.77
15.00	149.79	-2.54	0.78
16.00	147.45	-2.34	0.80
17.00	145.29	-2.16	0.81
18.00	143.28	-2.01	0.82
19.00	141.41	-1.87	0.83
20.00	139.65	-1.76	0.84
21.00	138.00	-1.65	0.85
22.00	136.45	-1.55	0.86
23.00	134.98	-1.47	0.87
24.00	133.59	-1.39	0.88
25.00	132.27	-1.32	0.89
26.00	131.01	-1.26	0.90
27.00	129.81	-1.20	0.90
28.00	128.67	-1.14	0.91
29.00	127.57	-1.09	0.92
30.00	126.52	-1.05	0.93
31.00	125.52	-1.01	0.93
32.00	124.55	-0.97	0.94
33.00	123.62	-0.93	0.95
34.00	122.73	-0.90	0.96
35.00	121.86	-0.86	0.96
36.00	121.03	-0.83	0.97
37.00	120.23	-0.80	0.98
38.00	119.45	-0.78	0.98
39.00	118.69	-0.75	0.99
40.00	117.96	-0.73	0.99
41.00	117.26	-0.71	1.00

Elaboración: Propia

Realizando una gráfica entre unidad de carga y factor “F” se obtiene una ecuación exponencial para obtener el factor “F” en función de la carga.

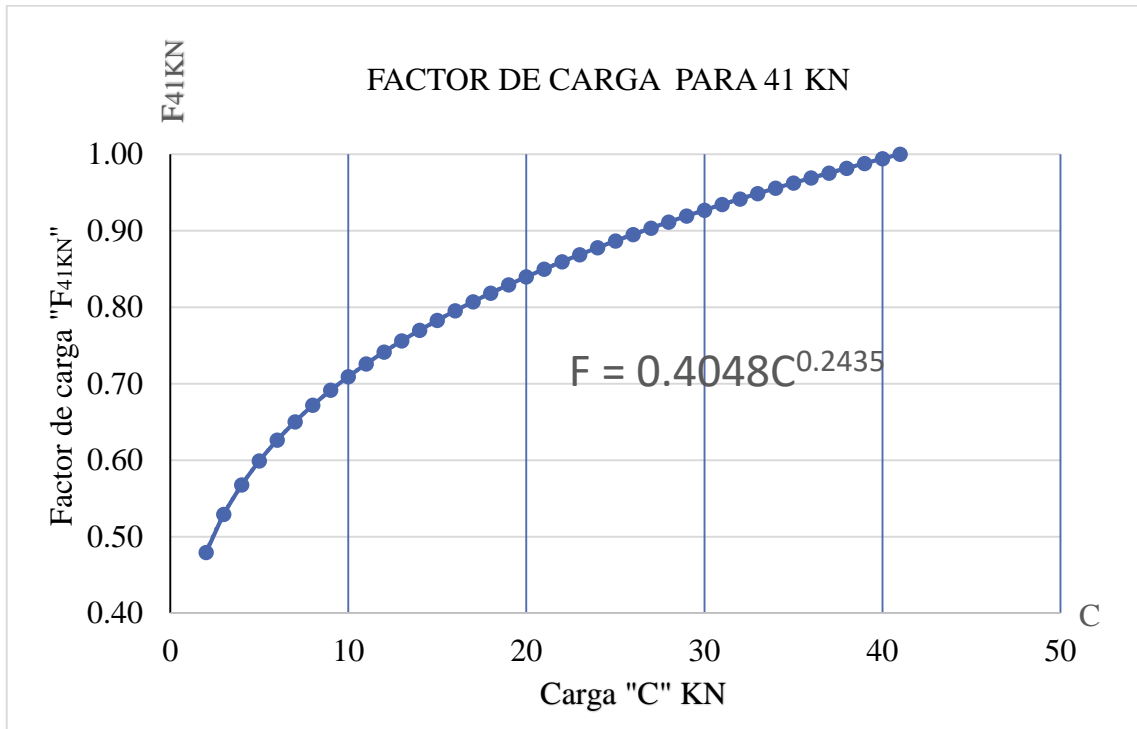


Figura 37: Factor de carga – módulo resiliente.
Fuente: Propia.

El modelo matemático de resistencia del suelo queda de la siguiente manera:

$$Mrp = Mrn \times F$$

$$Mrp = Mrn * 0.4048C^{0.2435}$$

$$Mrp = Mrn * kC^{k_1}$$

Mrp : Módulo resiliente proyectada a 40KN a calcular.

Mrn : Módulo resiliente obtenido en campo mediante el equipo LWD

C : Carga obtenida en campo mediante el equipo LWD

k : Constante de incremento por características del suelo

k_1 : Constante de incremento por aplicación de carga

En la tabla 34, se muestran los valores de constantes k y k_1 , del modelo matemático de resistencia del suelo, para 04 tipos de estructuras de pavimentos.

Tabla 34:
Constantes k y k_1 en un modelo matemático de resistencia del suelo para diferentes tipos de pavimentos.

Pavimento	Capa	Constantes de deflexión	
		k	k_1
Tipo 3	Base	0.70	0.10
	Subbase	0.40	0.24
	Subrasante	0.27	0.36
Tipo 6	Base	0.64	0.12
	Subbase	0.26	0.37
	Subrasante	0.33	0.30
Tipo 13	Base	0.68	0.09
	Subbase	0.40	0.27
	Subrasante	0.30	0.37
Tipo 29	Base	0.71	0.11
	Subbase	0.54	0.26
	Subrasante	0.26	0.37

Elaboración: Propia

Al contar con el modelo matemático de resistencia del suelo se obtiene el valor de los módulos resilientes, para los 28 puntos de ensayos en la capa de subbase del pavimento tipo 6, con la data suministrada en campo por el equipo LWD.

Con los resultados de módulos resilientes del diseño estructural y de campo haciendo uso de la correlación del ensayo de CBR, en la tabla 35, se verifica la diferencia de resultados, con el obtenido mediante el modelo matemático de resistencia del suelo utilizando los datos de campo haciendo uso del equipo Light Falling Weight Deflectometer en la capa subbase del pavimento tipo 06.

Tabla 35:
Diferencia de módulos resilientes en capa subbase del pavimento tipo 06

Muestra	Datos de Campo				Cálculos (d)			Diferencia entre M_{rc} y M_r LWD en %
	(a)	(b)	(c)		Factor	(Módulo resiliente en Mpa.)	(Promedio M_r en Mpa.)	
			(Módulo resiliente M_r) Mpa.	Carga en KN				
1	113.76	137.89	177	5.71	0.62	110	138.73	0.61
2	113.76	137.89	210	8.10	0.67	142	138.73	0.61
3	113.76	137.89	159	7.20	0.65	104	138.73	0.61
4	113.76	137.89	126	7.24	0.66	83	138.73	0.61
5	113.76	137.89	169	7.07	0.65	110	138.73	0.61
6	113.76	137.89	198	7.12	0.65	129	138.73	0.61

7	113.76	137.89	278	7.51	0.66	184	138.73	0.61
8	113.76	137.89	221	7.68	0.67	147	138.73	0.61
9	113.76	137.89	218	7.33	0.66	143	138.73	0.61
10	113.76	137.89	288	7.78	0.67	192	138.73	0.61
11	113.76	137.89	142	7.32	0.66	93	138.73	0.61
12	113.76	137.89	182	7.71	0.67	121	138.73	0.61
13	113.76	137.89	197	7.49	0.66	130	138.73	0.61
14	113.76	137.89	227	7.12	0.65	148	138.73	0.61
15	113.76	137.89	151	7.57	0.66	100	138.73	0.61
16	113.76	137.89	237	5.41	0.61	145	138.73	0.61
17	113.76	137.89	305	7.00	0.65	198	138.73	0.61
18	113.76	137.89	237	7.18	0.65	155	138.73	0.61
19	113.76	137.89	199	7.48	0.66	131	138.73	0.61
20	113.76	137.89	203	7.34	0.66	134	138.73	0.61
21	113.76	137.89	321	6.92	0.65	208	138.73	0.61
22	113.76	137.89	205	6.70	0.64	132	138.73	0.61
23	113.76	137.89	247	7.50	0.66	163	138.73	0.61
24	113.76	137.89	216	7.58	0.66	143	138.73	0.61
25	113.76	137.89	161	7.61	0.66	107	138.73	0.61
26	113.76	137.89	204	7.34	0.66	134	138.73	0.61
27	113.76	137.89	209	7.20	0.65	137	138.73	0.61
28	113.76	137.89	248	7.00	0.65	161	138.73	0.61

Ⓐ Módulo resiliente en Mpa del diseño estructural del pavimento calculado a través del resultado del CBR del material.

Ⓑ Módulo resiliente de campo en Mpa del material usado en campo y calculado a través del resultado del CBR del material.

Ⓒ Datos de módulos resilientes de campo usando un equipo Leight Weight Deflectometer.

Ⓓ Módulos resilientes calculados a través de un modelo matemático de resistencia del suelo

Elaboración: Propia

En la tabla 36, se muestra la variación en porcentaje, entre los resultados de un modelo matemático de resistencia del suelo y el módulo resiliente de campo a través del CRB para cada capa estructural del suelo de los 04 tipos de pavimentos.

Tabla 36:

Variación en porcentaje del módulo resiliente en Mpa entre un modelo matemático de resistencia del suelo y CBR del material de campo

Capa	Tipo 3			Tipo 6		
	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
Calculo						
Base	221.00	227.50	-2.64	234.00	227.50	2.86
Subbase	128.50	137.89	-6.46	138.73	137.89	0.61
Subrasante	201.00	194.00	3.61	113.00	108.80	3.86

Capa	Tipo 13			Tipo 29			
	Calculado	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
Base		234.50	227.50	3.08	220.50	227.50	-3.08
Subbase		144.00	137.89	4.43	128.40	137.89	-6.88
Subrasante		200.00	194.00	3.09	199.00	194.00	2.58

Ⓐ) Módulo resiliente de campo en Mpa a través del modelo matemático de resistencia del suelo

Ⓑ) Módulo resiliente de campo a través del CBR

Ⓒ) Variación en porcentaje entre Ⓐ y Ⓑ

Elaboración: Propia

A continuación, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson “r”. En la tabla 37, se muestra la medición de relación de variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson para la capa de subbase del pavimento tipo 06.

Tabla 37:

Medición de relación de variables en capa subbase del pavimento tipo 06 –Módulo resiliente

Ensayo	Carga KN	Módulo resiliente (Mpa)	Ensayo	Carga KN	Módulo resiliente (Mpa)	Ensayo	Carga KN	Módulo resiliente (Mpa)
1	2.39	19.41	31.00	3.28	21.77	61.00	7.58	34.94
2	3.66	19.41	32.00	3.23	21.86	62.00	7.12	32.88
3	5.30	19.42	33.00	4.41	21.10	63.00	7.93	34.84
4	6.96	19.19	34.00	4.46	21.05	64.00	7.85	34.08
5	7.69	18.32	35.00	4.51	21.15	65.00	8.99	33.43
6	2.94	28.70	36.00	5.27	20.64	66.00	9.29	31.55
7	2.43	30.05	37.00	5.63	20.54	67.00	9.25	32.75
8	2.59	29.99	38.00	5.28	20.73	68.00	9.14	31.26
9	3.51	28.21	39.00	6.93	19.83	69.00	2.98	44.63
10	3.55	27.83	40.00	5.80	20.49	70.00	3.53	42.60
11	3.73	27.63	41.00	5.89	20.75	71.00	5.00	42.15
12	4.59	26.53	42.00	5.46	20.75	72.00	5.64	36.42
13	4.44	26.75	43.00	7.32	20.57	73.00	7.48	34.53
14	5.18	25.53	44.00	7.18	20.75	74.00	7.18	34.33
15	6.09	25.02	45.00	7.27	20.61	75.00	8.46	30.92
16	5.66	25.86	46.00	8.83	20.45	76.00	8.12	33.17
17	6.16	25.63	47.00	8.98	20.54	77.00	8.87	32.31
18	6.85	24.66	48.00	2.72	51.20	78.00	8.66	27.44
19	7.08	24.66	49.00	2.60	52.34	79.00	2.88	27.40
20	7.08	24.55	50.00	2.75	51.89	80.00	3.03	26.02
21	6.96	24.64	51.00	3.30	46.96	81.00	4.24	24.82
22	7.45	24.51	52.00	3.33	45.95	82.00	4.30	25.31

23	7.35	24.76	53.00	3.41	45.70	83.00	5.28	24.03	
24	7.80	24.44	54.00	5.24	38.14	84.00	6.88	23.08	
25	8.29	24.44	55.00	5.41	38.64	85.00	6.88	23.08	
26	8.65	24.03	56.00	5.31	39.09	86.00	6.77	24.24	
27	3.50	21.13	57.00	6.79	33.39	87.00	7.58	23.76	
28	2.77	21.84	58.00	7.07	33.33	88.00	7.61	23.29	
29	2.76	22.09	59.00	7.03	34.71	89.00	8.99	23.31	
30	3.26	21.86	60.00	7.31	34.62	90.00	9.16	23.41	
							Sumatoria	525.36	2546.58
							Media	5.84	28.30
							Desviación	25.63	121.76
							Cuartil 1	3.68	21.85
							Cuartil 2	5.85	25.16
							Cuartil 3	7.43	33.29
							Varianza	2744.83	
							Curtosis	-0.45	
							Coefficiente de correlación "r"	0.88	

Elaboración: Propia

Al calcular el coeficiente de correlación de Pearson entre dos variables para la capa de subbase del pavimento tipo 06, se obtiene un coeficiente de Pearson "r" de 0.88, siendo esta una relación directa y de correlación fuerte.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados

4.1.1 Modelo de análisis mecánico del suelo

En la tabla 19, se muestran los resultados de modelos de análisis mecánico del suelo para cada capa estructural de 04 tipos de estructuras de pavimentos flexibles, el cual tiene el fin de calcular su deflexión admisible.

En la tabla 38, se muestran resultados de deflexión admisible de los 04 tipos de estructura de pavimento para cada capa estructural. Estos resultados son calculados según el modelo de análisis mecánico del suelo, programa pitrapave y usando la formula CONREVIAL del manual de pavimentos del MTC.

Tabla 38:

Deflexiones calculadas ($\times 10^{-2}$ mm)

Capa	Tipo 3			Tipo 6			Tipo 13			Tipo 29		
	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ
Calculado												
Asfáltica	49.6	50	123	49.2	49	97	63.1	63	202	47.7	48	86
Base	56.7	57	-	58	58	-	69.3	69	-	58.9	59	-
Subbase	58.8	59	-	67.1	67	-	79	79	-	68.6	69	-
Subrasante	79	79	-	91	91	-	109.61	110	-	94.1	94	-

Ⓐ Modelo de análisis mecánico del suelo

Ⓑ Programa Prtrapave

Ⓒ Conrevial – MTC

Elaboración: Propia.

Prueba de hipótesis específica 01

A continuación, se realiza la contrastación de hipótesis – Prueba T-Student para la diferencia de medias poblacionales.

Paso 01: Se describe la hipótesis específica 01

“Un modelo de análisis mecánico del suelo determina satisfactoriamente la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible”.

Se presenta las hipótesis estadísticas:

H_0 = Determina satisfactoriamente la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible

H_1 = No determina satisfactoriamente la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible

$$H_0: U_1 - U_2 = \pm 7.50\%$$

$$H_1: U_1 - U_2 > 7.50\% \text{ y } U_1 - U_2 < -7.50\%$$

Donde:

U_1 = Promedio datos Post test del grupo experimental

U_2 = Promedio datos Pre test del grupo de control

Paso 02: Se designa el nivel de significancia

$$\alpha = 0.05$$

Paso 03: Cálculo de valores crítico y de prueba

En la tabla 39, 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 39:

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

Tipo de contrastación de la hipótesis: Mayor que		Tipo de contrastación de la hipótesis: Menor que	
Muestra U_1	Muestra U_2	Muestra U_1	Muestra U_2
49.60	50	49.60	50
56.70	57	56.70	57
58.80	59	58.80	59
79.00	79	79.00	79
49.20	49	49.20	49
58.00	58	58.00	58
67.10	67	67.10	67

	91.00	91	91.00	91
	63.10	63	63.10	63
	69.30	69	69.30	69
	79.00	79	79.00	79
	109.61	110	109.61	110
	47.70	48	47.70	48
	58.90	59	58.90	59
	68.90	69	68.90	69
	94.10	94	94.10	94
Media	68.75	68.81	68.75	68.81
Desviación Estándar	17.70	17.69	17.70	17.69
Tamaño de Muestra	16	16	16	16
Valor Tabular: Dist.Normal	1.64		-1.64	
Valor Tabular: Dist. T Student (tc)	1.70		-1.70	
Estadístico de Prueba (tp)	-0.01		-0.01	

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 $-0.01 <$ al valor crítico (tc) 1.70, por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Para el tipo de contrastación de la hipótesis “menor que”, se puede ver que el valor estadístico de prueba (tp) es $-0.01 >$ al valor crítico (tc) -1.70, por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Conclusión:

Se determina satisfactoriamente la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible en los datos post test luego de aplicar la variable independiente.

4.1.2 Modelo matemático de deformación del suelo

En la tabla 26, se muestra que una ecuación cuadrática con proyección a 41 KN proporciona resultados similares al obtenido según el manual de ensayos de materiales del MTC (2016) - MTC E 1006 – “Medidas de deflexión de un pavimento empleando Viga Benkelman”. Con esta ecuación cuadrática obtenida, se genera un factor “f” por unidad de carga, resultando un modelo matemático de deformación del suelo de la siguiente manera:

$$d_p = d_n * kC^{k_1}$$

Donde:

d_p : Deflexión proyectada a 41KN a calcular

d_n : Deflexión obtenida en campo mediante el equipo LWD

C: Carga obtenida en campo mediante el equipo LWD

k : Constante por características del suelo

k_1 : Constante por aplicación de carga

En la tabla 28, se muestra las constantes k y k_1 para cada capa estructural del suelo de 04 tipos de pavimentos.

En la figura 38, se muestra un deflectograma, calculados mediante un modelo de deformación del suelo, las 28 muestras son datos proporcionados en campo por el equipo Viga Benkelman y LWD, este deflectograma es una representación gráfica para interpretar su evaluación estructural de la capa subbase del pavimento tipo 6.

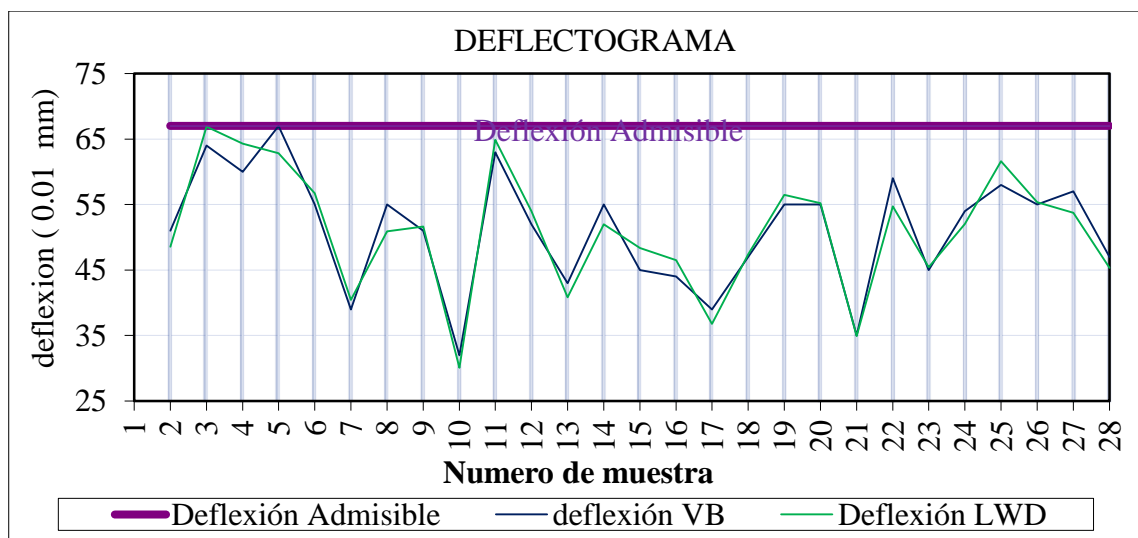


Figura 38: Deflectograma de la capa subbase del pavimento tipo 06
Fuente: Propia

Prueba de hipótesis específica 2

A continuación, se realiza la contrastación de hipótesis – Prueba T-Student para la diferencia de medias poblacionales.

Paso 01: Se describe la hipótesis específica 02

“Un modelo matemático de deformación del suelo determina satisfactoriamente la deflexión de las capas estructurales de un pavimento flexible”.

Se presenta las hipótesis estadísticas:

H_0 = Determina satisfactoriamente la deflexión de las capas estructurales de un pavimento flexible

H_1 = No determina satisfactoriamente la deflexión de las capas estructurales de un pavimento flexible

$H_0: U_1 - U_2 = +/- 7.50\%$

$H_1: U_1 - U_2 > 7.50\% \text{ y } U_1 - U_2 < -7.50\%$

Donde:

U_1 = Promedio datos Post test del grupo experimental

U_2 = Promedio datos Pre test del grupo de control

Paso 02: Se designa el nivel de significancia

$\alpha = 0.05$

Paso 03: Cálculo de valores crítico y de prueba

En la tabla 40, se muestra el cálculo de los valores crítico (t_c) y de prueba (t_p) – T-Student, para tamaños de muestras pequeños ($n_i < 30$). Donde el valor crítico (t_c) está en función del grado de libertad y confiabilidad.

Tabla 40:

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

	Tipo de contrastación de la Hipótesis: Mayor que		Tipo de contrastación de la Hipótesis: Menor que	
	Muestra U ₁	Muestra U ₂	Muestra U ₁	Muestra U ₂
	62.37	63	62.37	63
	48.57	51	48.57	51
	66.88	64	66.88	64
	64.33	60	64.33	60
	62.84	67	62.84	67
	56.74	55	56.74	55
	40.43	39	40.43	39
	50.90	55	50.90	55
	51.62	51	51.62	51
	30.07	32	30.07	32
	64.91	63	64.91	63
	54.00	52	54.00	52
	40.82	43	40.82	43
	52.00	55	52.00	55
	48.37	45	48.37	45
	46.51	44	46.51	44
	36.80	39	36.80	39
	47.38	47	47.38	47
	56.50	55	56.50	55
	55.19	55	55.19	55
	34.93	35	34.93	35
	54.71	59	54.71	59
	45.42	45	45.42	45
	52.05	54	52.05	54
	61.63	58	61.63	58
	55.37	55	55.37	55
	53.75	57	53.75	57
	45.32	47	45.32	47
Media	51.44	51.61	51.44	51.61
Desviación Estándar	9.34	8.95	9.34	8.95
Tamaño de Muestra	28	28	28	28
Valor Tabular: Dist.Normal		1.65		-1.65
Valor Tabular: Dist. T Student (tc)		1.67		-1.67
Estadístico de Prueba (tp)		-0.07		-0.07

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 $-0.07 <$ al valor crítico (t_c) 1.67 , por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Para el tipo de contrastación de la hipótesis “menor que”, se puede ver que el valor estadístico de prueba (t_p) es $-0.07 >$ al valor crítico (t_c) -1.67 , por lo tanto acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Conclusión:

Se determina satisfactoriamente la deflexión de las de las capas estructurales de un pavimento flexible en los datos post test luego de aplicar la variable independiente.

4.1.3 Modelo matemático de resistencia del suelo

En la tabla 32, se muestra que una ecuación exponencial con proyección a 41 KN. proporciona resultados similares al obtenido mediante al valor del CBR del material utilizado en campo. Con esta ecuación exponencial, se genera un factor “f” por unidad de carga, resultando un modelo matemático de resistencia del suelo de la siguiente manera:

$$M_{rp} = M_{rc} * kC^{k_1}$$

Donde:

M_{rp} : Módulo resiliente proyectada a 41 KN.

M_{rc} : Módulo resiliente de campo mediante el equipo LWD

C: Carga obtenida en campo mediante el equipo LWD

k: Constante por características del suelo

k_1 : Constante por aplicación de carga

En la tabla 34, se muestra las constantes k y k_1 para cada capa estructural del suelo de 04 tipos de pavimentos.

En la figura 39, se muestra un diagrama de módulos resilientes, con los valores calculados de las 28 muestras de la capa subbase del pavimento tipo 06, el cual ayuda para interpretar su evaluación estructural.

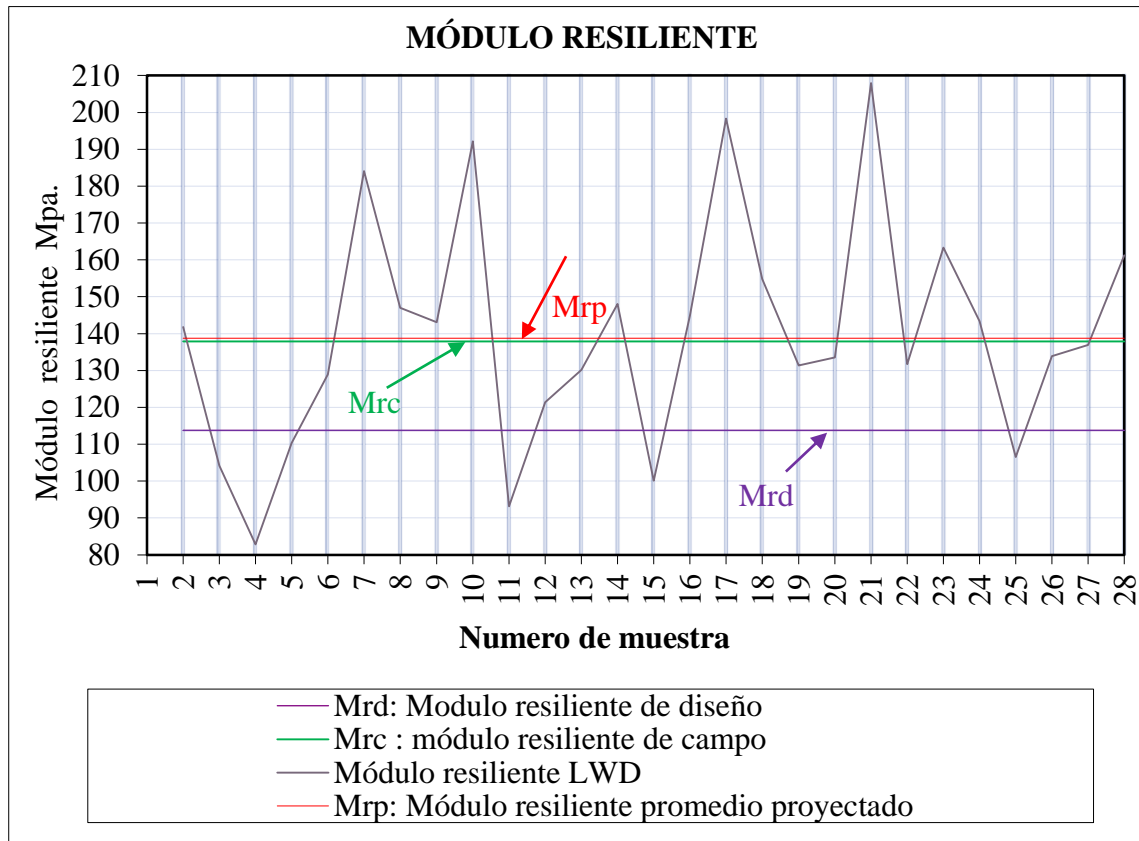


Figura 39: Diagrama de resultados de módulos resilientes.
Fuente: Propia.

Prueba de hipótesis específica 03

A continuación, se realiza la contrastación de hipótesis – Prueba T-Student para la diferencia de medias poblacionales.

Paso 01: Se describe la hipótesis específica 03

“Un modelo matemático de resistencia del suelo determina satisfactoriamente el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible”.

Se presenta las hipótesis estadísticas:

H_0 = Determina satisfactoriamente el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible

H_1 = No determina satisfactoriamente el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible

$$H_0: U_1 - U_2 = \pm 7.50 \%$$

$$H_1: U_1 - U_2 > 7.50 \% \quad \text{y} \quad U_1 - U_2 < -7.50\%$$

Donde:

U_1 = Promedio datos Post test del grupo experimental

U_2 = Promedio datos Pre test del grupo de control

Paso 02: Se designa el nivel de significancia

$$\alpha = 0.05$$

Paso 03: Cálculo de valores crítico y de prueba

En la tabla 41, se muestra el cálculo de los valores crítico (t_c) y de prueba (t_p) – T-Student, para tamaños de muestras pequeños ($n_i < 30$). Donde el valor crítico (t_c) está en función del grado de libertad y confiabilidad

Tabla 41:

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

Tipo de contrastación de la Hipótesis: Mayor que		Tipo de contrastación de la Hipótesis: Menor que	
Muestra U_1	Muestra U_2	Muestra U_1	Muestra U_2
221	227.50	221	227.50
128.50	137.38	128.50	137.38
201	194	201	194
234	228	234	228
138.73	137.89	139	137.89

	113	108.80	113	108.80
	234.50	227.50	234.50	227.50
	144	137.89	144	137.89
	200	194	200	194
	220	227.50	220	227.50
	128.40	137.89	128.40	137.89
	199	194.00	199	194.00
Media	180.20	179.23	180.20	179.23
Desviación Estándar	45.87	44.43	45.87	44.43
Tamaño de Muestra	12	12	12	12
Valor Tabular: Dist.Normal		1.64		-1.64
Valor Tabular: Dist. T Student (tc)		1.72		-1.72
Estadístico de Prueba (tp)		0.05		0.05

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 $0.05 <$ al valor crítico (tc) 1.72, por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Para el tipo de contrastación de la hipótesis “menor que”, se puede ver que el valor estadístico de prueba (tp) es $0.05 >$ al valor crítico (tc) -1.72, por lo tanto, acepto la hipótesis estadística H_0 y Rechazo la hipótesis estadística H_1 .

Conclusión:

Se determina satisfactoriamente el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible en los datos post test luego de aplicar la variable independiente.

4.2 Análisis de resultados

4.2.1 Modelo de análisis mecánico del suelo

Al usar un modelo de análisis mecánico del suelo, en cada capa estructural de los 04 tipos de pavimentos flexibles, brinda resultados de deflexión admisible similares, a los resultados realizados por el programa Pitrapave.

Utilizando un modelo de análisis mecánico del suelo, en cada capa estructural de los 04 tipos de pavimentos, proporciona resultados de deflexión admisible conservadores con respecto a los resultados utilizando mediante la fórmula de CONREVIAl indicado en el manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos, sección de suelos y pavimentos.

Al llevar los controles con los resultados de deflexión admisible, obtenidos mediante un modelo de análisis mecánico del suelo, en cada capa estructural de los 04 tipos de estructura del pavimento flexible, se tendrá un pavimento de calidad y duradero.

4.2.2 Modelo matemático de deformación del suelo

Al usar un modelo matemático de deformación del suelo, proyectado a 41 KN de carga, se obtiene resultados de deflexión de campo similares, a los resultados de deflexión de campo haciendo uso del equipo viga Benkelman.

De los resultados obtenidos, mediante el modelo matemático de deformación del suelo, se observa que, debido a la menor resistencia de la subrasante se presenta mayores deflexiones.

Al usar un modelo matemático de deformación del suelo, los resultados de deflexión son inferiores a la deflexión admisible, esto indica que la capa del suelo cuenta con un soporte estructural que satisface la proyección de cargas que se le aplicaran.

4.2.3 Modelo matemático de resistencia del suelo

Al usar un modelo matemático de resistencia del suelo, proyectado a 41 KN de carga y, al promediarlo, se obtiene resultados de módulos resilientes, similares a los resultados de módulos resilientes de campo, obtenido mediante el ensayo del CBR del material.

De los resultados obtenidos mediante el modelo matemático de resistencia del suelo, se observa que, debido a la menor resistencia de la subrasante, se presenta menores módulos resilientes.

A menores aplicaciones de cargas a una capa del suelo, el valor del módulo resiliente es elevado.

Al usar un modelo matemático de resistencia del suelo, los resultados de módulos resilientes son superiores al módulo resiliente adoptado en el diseño de pavimentos, el cual, indica que el material utilizado en la capa estructural, cuenta con una resistencia satisfactoria.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, en las tablas respectivas, concluimos que:

- a. El modelo de análisis mecánico del suelo, obtenido, permite obtener resultados de deflexiones admisibles, en cada capa estructural de un pavimento flexible, en una variación de $\pm 1.00\%$, con respecto a los resultados obtenidos mediante el programa pitrapave, de acuerdo a la tabla 20.

- b. El modelo matemático de deformación del suelo, obtenido, permite obtener resultados de deflexiones de campo, en cada capa estructural de un pavimento flexible, en una variación de $\pm 7.50\%$, con respecto a los resultados calculados con el manual de ensayos de materiales del MTC (2016) - MTC E 1006, esta variación se muestra en la tabla 29.

- c. El modelo matemático de resistencia del suelo, permite obtener el módulo resiliente en cada capa estructural de un pavimento flexible, en una variación de $\pm 7.50\%$, con respecto a los resultados calculados a través del CBR del material usado en obra, este porcentaje de variación se muestra en la tabla 36.

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- a. Obtener un modelo de análisis mecánico del suelo, para cada capa estructural de un pavimento flexible diseñado, para determinar las deflexiones admisibles, en la capa subrasante, subbase, base y carpeta asfáltica según sus características del suelo y cargas actuantes previo a su construcción.
- b. Buscar un modelo matemático de deformación del suelo, para cada capa estructural de un pavimento flexible diseñado, para determinar las deflexiones de campo, en la capa subrasante, subbase y base, según recopilación de datos al realizar ensayos con el equipo LWD y VB en campo.
- c. Obtener un modelo matemático de resistencia del suelo, para cada capa estructural de un pavimento flexible diseñado, para determinar sus módulos resilientes de campo, en la capa subrasante, subbase y base, según recopilación de datos al realizar ensayos con el equipo LWD.

REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials E2583. (2015). *Método de ensayo estándar para la determinación de deflexiones haciendo uso de un deflectómetro de impacto portable (LWD)*. Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORIC AL/E2583-07.htm>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books/about/AASHTO_Guide_for_Design_of_Pavement_Stru.html?id=15AmgEACAAJ&redir_esc=y
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide*. Recuperado de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712666/AASHTO08.pdf>
- Alonso, G. (2020). *Diseño estructural de pavimento y viabilidad económica de tres rutas cantonales en la comunidad de Turrialba* (tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Alves, M., Ribeiro, P., Alves C. & Guimarães A. (2015). Estudio comparativo de los valores de Mr obtenidos con equipos LWD y en laboratorio. En L. Basso (presidencia), *44ª Reunión anual de pavimentación y 18º Encuentro nacional de conservación de carreteras*. Conferencia llevada a cabo en la 4ta Expo Pavimentación, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Balarezo, J. (2017). *Evaluación estructural usando viga Benkelman aplicada a un pavimento* (tesis de pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Calderón, J. (2015). *Evaluación de capas granulares en pavimentos flexibles con el deflectómetro de impacto liviano* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

- Cárdenas, J. (2018). *Influencia del tráfico vehicular con respecto a las deflexiones de los pavimentos flexibles en zona urbana de la ciudad de Huancayo, Junín - 2017* (tesis de posgrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Chang, C., Vidal, J., Bustos, M., Delgadillo, R. y Loría, G. (2013). Aplicabilidad del método mecanístico-empírico de diseño de pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en Latinoamérica. *Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR*, 10 p. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/808>
- Condorchoa, C. (2019). *Factor clima y su relación con el deterioro de los pavimentos rígidos en Ica año 2019* (tesis de posgrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Corredor, G. (2008). Experimento vial de la AASHO y las guías de diseño AASHTO. Lima, Perú. *Editorial Universidad Nacional de Ingeniería*, 90 p. Recuperado de https://www.academia.edu/15076795/Experimento_Vial_de_la_AASHO_y_las_Gu%C3%ADas_de_Dise%C3%B1o_AASHTO
- Cruz, J., Escobar, C. (2019). *Análisis comparativo de software multicapa elástico para evaluación mecánica de pavimentos flexibles* (tesis de pregrado). Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia, Ibagué.
- Deol, G., Kumar, V. y Rakesh, K. (2016). Estudios comparativos del deflectómetro liviano (LWD) y deflectómetro de viga benkelman (VB) en carreteras de bajo volumen. *ScienceDirect*, 3(5), 438-447. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756416302008>
- Escobar, K., García, A., & Guzmán, C. (2007). *Análisis comparativo de pavimentos por medio de la viga Benkelman y el deflectómetro de impacto (falling weight deflectometer, FWD)* (tesis de pregrado). Universidad de El Salvador, San salvador, El Salvador.

- Fleming, P., Rogers, C. y Frost, M. (2008). Una comparación de dispositivos para medir la rigidez in-situ. *Unbound aggregates in road construction*, 1(5), 193-200. Recuperado de https://repository.lboro.ac.uk/articles/A_comparison_of_devices_for_measuring_stiffness_in_situ_/9432374
- Grontmij A/S, Pavement Consultants. (2016). Manual del usuario Deflectómetro de impacto liviano (LWD). Recuperado de https://company.intertraffic.com/?a=nrKid4ZQ_gN8%2FxFxSohby0gaZKfVwvDbIZO6EttbWvngrY%3D
- Gutiérrez, E., Gutiérrez, L. & Pessa, G. (2010, 17 de setiembre). Análisis estructural de pavimentos flexibles basado en el comportamiento elástico lineal y no lineal de capas granulares. Recuperado de jornadasaie.org.ar
- Herrera, E. (28 de setiembre de 2009). Modelación matemática de la distribución de la carga docente de los profesores en la universidad de matanzas. *Revista avanzada científica. Volumen* (12), p. 12.
- Hoffman M., Del Aguila P. (1985, 03 de octubre). Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones (ensayos no destructivos). *Librotext*. Recuperado de https://d1wqtxts1xzle7.Cloudfront.net/32999561/MODELO_CALCULO_HOGG.pdf?1392443981=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DESTUDIOS_DE_EVALUACION_ESTRUCTURAL_DE_PA.pdf&Expires=1595091155&Signature=Pa5LgLyADKorQwyUCYWxmPLtz91LWcvK8t~3-KMY83IODt9VvWP62oiNkN4Nh1nVYC9itT~-mpqhUij7hZqru5TePdXEI-Lh5P-JNaSruPtRXSV0NEX9~ZHPMmuctAY11tOUR8J~wMlg1EjFApOQz7vGm3ZRfmBHllwxGTD8Fu6LvcEgR99vq-piEmojiVPFc3o5Yv1YViEcd~bb5PINHzwUtTisn3w886INZXQ-rkk~oI9MdG-uXj0fYHD~NB8gBsKuQHaC1BIsvDULzvntRiSDZUPhqWIuwN8nIa53g3CySRhOhIhg0z2PhHsT-rVOnUmadZQUS3uWfsCGvBpGaw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Hidalgo, F. (2007). *Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos*. (tesis de pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.

- Higuerra, C. (25 de julio de 2008). Leyes de comportamiento de la deflexión admisible en pavimentos flexibles. *Revista de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja, Colombia*. Volumen (17), pp 7-14.
- Huang, Y. (2005). *Pavement analysis and design*. Washington D. C., United State of america: Pearson Prentice Hall.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2003). *Mecánica de Materiales para Pavimentos* (197). recuperado de http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/Publicacion_Tecnica/pt197.pdf
- Jiménez, M. (2014). *Diagnóstico estructural de afirmado estabilizado con Cloruro de Magnesio mediante el modelo matemático de Hogg y viga Benkelman* (tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Loría, G., Camacho, E., Leiva, F., (2013). Diagnóstico de no linealidad de materiales granulares y suelos mediante el uso de técnicas deflectométricas. *Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR*, 12 p. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/777/CILA%202015%20-%20DIAGN%C3%93STICO%20DE%20NO%20LINEALIDAD%20DE%20MATERIALES%20GRANULARES%20Y%20SUELOS%20MEDIANTE%20EL%20USO%20DE%20T%C3%89CNICAS%20DEFLECTOM%C3%89TRICAS.pdf?sequence=1>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, sección de suelos y pavimentos*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html

- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2017). *Manual de ensayo de materiales EM 2017*. Recuperado de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Bogotá, Colombia: Stella Valbuena de Fierro.
- Osorio, A. (2008). *Metodología de evaluación in-situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el deflectómetro de impacto liviano* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica de Chile, Región metropolitana de Santiago, Chile.
- Programa de Infraestructura del Transporte de Pavimentos. (2015). *Software de multicapa elástica para análisis de pavimentos flexibles*. Recuperado de www.lanamme.ucr.ac.cr/index.php/centro-de-descarga/pitra-pave/descripción-pitra-pave.html
- Papagiannakis, A. (Ed). (2008). *Pavement Design and Materials*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=wipJ0qBvv40C&oi=fnd&pg=PA12&ots=AnEYkH5YHC&sig=qDC6N4CEpOSnI147cGoQ9QaqUgo&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Pérez, A. (2018, 03 de setiembre). Coeficiente de Poisson. *Mecapedia*. Recuperado de http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm
- Quiñones, D. (2015). *Uso del deflectómetro de impacto liviano (LWD), para la aplicación del retrocálculo en carreteras no asfaltadas, caso práctico: proyecto regional cuzco* (Tesis de pregrado). Universidad nacional de ingeniería, Lima, Perú.
- Ríos, I. (2019). *Modelos de deterioro del pavimento y su correlación con las evaluaciones funcionales de los años 2010-2016, en la carretera Inambari – Azángaro* (Tesis de maestría). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Rodríguez, I. (2018). *Verificación del módulo elástico de bases granulares obtenido a través del deflectómetro de impacto liviano (LWD) empleando celdas de presión*

(tesis de maestría). Pontificia universidad católica de chile, Región metropolitana de Santiago, Chile.

Rodríguez, J., Steegmann, C., (2002, 18 de octubre). Modelos matemáticos. Proyecto e-Math. Recuperado de http://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/08/Modelos_matematicos.pdf



Simón, L. (2019). *Modelo de gestión de conservación vial para optimizar los costos de mantenimiento en la carretera Dv. Rio Seco – Oyón, Año-2019* (tesis de maestría). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Solminihaq, H. (2005). *Gestión de infraestructura vial*. Bogotá, Colombia: Alfaomega.



Sotil, A. (10 de enero de 2014). Estado del arte de la ingeniería de pavimentos. *Revista de Ingeniería de la USIL*. Volumen (1), pp 77-83.

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>		
Pérez Pacori, Granvil Riter		
en condición de egresado del Programa de Posgrado:		
Ingeniería Vial con mención en Carreteras, Puentes y Túneles		
deja constancia que ha elaborado la tesis intitulada:		
Modelos de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de suelos 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>		
	17/06/2020	
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			
Dejo constancia que el área o dependencia que dirijo, ha tomado conocimiento del proyecto de tesis titulado:			
Modelos de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible			
el mismo que es realizado por el Sr./Srta. Estudiante (Apellidos y nombres):			
Pérez Pacori, Granvil Riter			
, en condición de estudiante - investigador del Programa de:			
Ingeniería Vial con Mención en Carreteras, Puentes y Túneles			
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.			
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:			
Nombre de la empresa: Rutas de Lima SAC		Autorización para el uso del nombre de la Empresa en el Informe Final	<input checked="" type="checkbox"/> NO
Apellidos y Nombres del Jefe/Responsable del área: Vera Silva, Jonathan Steve		Cargo del Jefe/Responsable del área: Gerente de Planeamiento y Control de Calidad	
Teléfono fijo (incluyendo anexo) y/o celular: 954145430		Correo electrónico de la empresa: jonathan.vera@rutasdelima.pe	
 Firma		77/06/2020 Fecha	

Anexo 03: Matriz de consistencia

En la tabla 42, se muestra la matriz de consistencia del trabajo de tesis “Modelos de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible”.

Tabla 42:
Matriz de Consistencia

Problemas Principal	Objetivos General	Hipótesis General	Variables Independiente	Indicador V.I.	Variables Dependiente	Indicador V.D.
¿De qué manera un modelo de ajuste de carga evalúa estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible?	Proponer un modelo de ajuste de carga a fin de evaluar estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible a través de una representación gráfica de datos de campo.	Un modelo de ajuste de carga evalúa estructuralmente las capas de suelos de un pavimento flexible.	Modelos de ajuste de carga	Características del suelo y cargas actuantes	Capas de suelos de un pavimento flexible	Deflexión admisible, deflexión y módulo resiliente

Problemas Especifico	Objetivos Específicos	Hipótesis Especificas	Variables Independiente	Indicador V.I.	Variables Dependiente	Indicador V.D.
¿De qué manera un Modelo de análisis mecánico del suelo influye en la deflexión admisible de las capas estructurales de un pavimento flexible?	Determinar un modelo de análisis mecánico del suelo para obtener su deflexión admisible en cada capa estructural de un pavimento flexible.	Un modelo de análisis mecánico del suelo determina la deflexión admisible de las capas de suelos de un pavimento flexible.	Modelo de análisis mecánico del suelo.	Características del suelo y cargas actuantes	Subrasante, subabase y base	Deflexión admisible
¿De qué manera un modelo matemático de deformación del suelo influye en la deflexión de las capas de un pavimento flexible?	Proponer un modelo matemático de deformación del suelo, con la finalidad de obtener la deflexión en cada capa estructural de un pavimento flexible.	Un modelo matemático de deformación del suelo determina la deflexión de las capas estructurales de un pavimento flexible.	Modelo matemático de deformación del suelo	Características del suelo y cargas actuantes	Subrasante, subabase y base	Deflexión de campo
¿De qué manera un modelo matemático de resistencia del suelo influye en el módulo resiliente de las capas de un pavimento flexible?	Proponer un modelo matemático de resistencia del suelo, con la finalidad de obtener el módulo resiliente en cada capa estructural de un pavimento flexible.	Un modelo matemático de resistencia del suelo determina el módulo resiliente de las capas estructurales de un pavimento flexible.	Modelo matemático de resistencia del suelo	Características del suelo y cargas actuantes	Subrasante, subabase y base	Módulos resilientes

Fuente y Elaboración: propia

Anexo 04: Matriz de Operacionalización

En la tabla 43, se muestra la matriz de operacionalidad del trabajo de tesis “Modelos de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible”.

Tabla 43:

Matriz de operacionalización

Variable Independiente	Indicador	Definición Conceptual	Dimensiones	Instrumento
Modelos de ajuste de carga	Características del suelo y cargas actuantes	Un modelo matemático es una descripción, en lenguaje matemático, de un objeto que existe en un universo no-matemático	Modelo de análisis mecánico del suelo, modelo matemático de deformación del suelo, modelo matemático de resistencia del suelo	Light weight deflectometer y Viga Benkelman
Variable Dependiente	Indicador	Definición Conceptual	Dimensiones	Instrumento
Capas de suelos de un pavimento flexible	Deflexión admisible, deflexión de campo 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.	Subrasante, subbase y base.	Light weight deflectometer y Viga Benkelman

Fuente y Elaboración: Propia

Anexo 05: Protocolos o Instrumentos utilizados

En la figura 40, se muestran los instrumentos utilizados para esta investigación.

Instrumentos utilizados	Imagen de instrumentos utilizados
Software Pitrapave	
Viga Benkelman (VB)	
Light Falling Weight Deflectometer (LWD)	

Figura 40: Instrumentos utilizados.
Fuente: Propia.

Anexo 06: Formato de instrumentos o protocolos utilizados

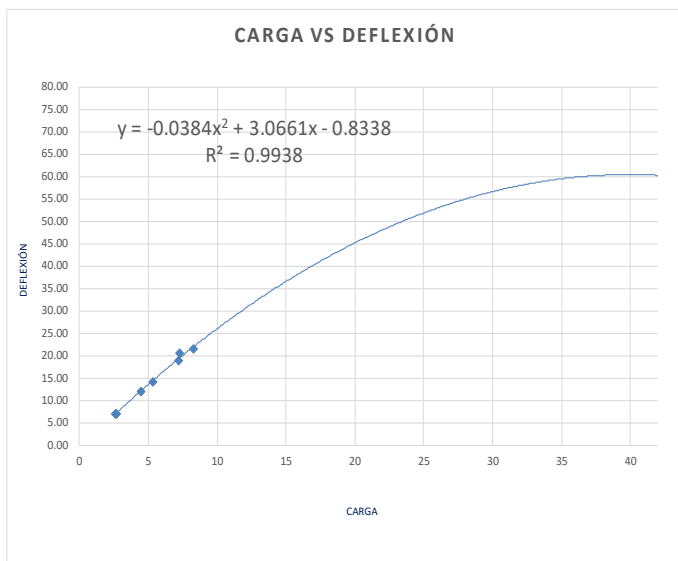
Formato de Protocolo para recolección de datos con el equipo Light Falling Weight Deflectometer

Modelos de ajuste de carga para evaluar estructuralmente capas de suelos de un pavimento flexible

REGISTRO : LWD-DEFLEX 025SB
 DESCRIPCIÓN : Deflexión de campo - LWD
 TRAMO : Vía auxiliar Cristóbal de Peralta
 Pavimento tipo 06, Prog. Km 0+943.94 - Km 1+458.21

FECHA : 18/04/2020
 N° REG.DEL MATERIA : SUBBASE 21 - 239
 CAPA O SUELO DE FUNDA. : Subbase

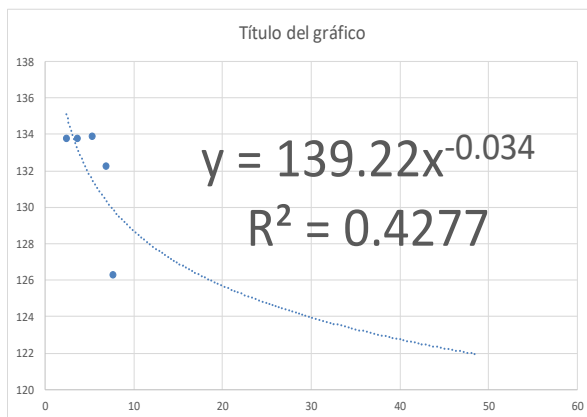
DEFLEXIÓN ADMISIBLE : 67 x 0.01 mm.
 DEFLEXIÓN Viga Benkelman : 60 x 0.01 mm.
DEFLEXIÓN



DATOS DE CAMPO - DEFLEXIÓN					
Ensayo Prog. (Km) : 1+035					
Carril / Lado : 02 / LD					
N° ENSAYO	LWD		N° ENSAYO	LWD	
	CARGA KN	DEFLEXIÓN X 0.01 mm		CARGA KN	DEFLEXIÓN X 0.01 mm
1					
2	2.67863	7.14			
3	2.66972	7.11			
4	2.65838	7.08			
5	4.47667	12.06			
6	5.37083	14.18			
7	7.31142	20.64			
8	7.24582	18.96			
9	8.3214	21.63			
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					

Módulo resiliente diseño : 20.68 Kpsi.
 Módulo resiliente campo : 21.00 Kpsi.

MÓDULO RESILIENTE



DATOS DE CAMPO - MÓDULO					
Ensayo Prog. (Km) : 1+035					
Carril / Lado : 02 / LD					
N° ENSAYO	LWD		N° ENSAYO	LWD	
	CARGA KN	MODULO RESILIENT E (K Psi)		CARGA KN	MODULO RESILIENT E (K Psi)
1	2.39273	19.41	29		
2	3.65946	19.41	30		
3	5.29551	19.42	31		
4	6.95829	19.19	32		
5		19.59	33		
6	7.68642	18.32	34		
7		19.77	35		
8		19.90	36		
9			37		
10			38		
11			39		
12			40		
13			41		
14			42		
15			43		
16			44		
17			45		
18			46		
19			47		
20			48		
21			49		
22			50		
23			51		
24			52		
25			53		
26			54		
27			55		
28			56		

Anexo 07: Tablas de confiabilidad y validez

En la tabla 44, se muestra la confiabilidad y validez de los instrumentos a utilizar.

Tabla 44:
Confiabilidad y validez

Recolección de datos	Instrumentos para utilizar	Norma de ensayo y/o teorías
Deflexión admisible	Software Pitrapave	Teoría de multicapa elástica
Deflexión de campo	Light Falling Weight Deflectometer (LWD)	ASTM E - 2583
Deflexión de campo	Viga Benkelman (VB)	ASTM D - 4695

Fuente y Elaboración: Propia