

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.Introducción**

Durante años en todo el mundo la construcción de capas de rodadura en los pavimentos asfálticos se ha realizado mediante mezclas asfálticas, las que son sometidas a la creciente demanda de tránsito a la acción de los agentes atmosféricos y a la variación de temperatura que inciden en el comportamiento eficaz del pavimento.

El diseño de mezclas asfálticas en nuestros días tiene como objetivo lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados pétreos y cemento asfáltico que forman parte de un sistema multicapas denominado pavimento. Estas, están destinadas a ser la capa de rodamiento, así como a proteger a las capas granulares de base subyacente de las inclemencias climáticas y de la circulación de los vehículos.

En los últimos tiempos se están presentando deterioros y fallas en los pavimentos que causan un déficit en el ámbito social y económico y para poder evitar que esto ocurra se debe realizar un análisis y un estudio a las mezclas asfálticas y poder cumplir con las exigencias.

El comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas es complejo debido a la diversidad de materiales que la conforman y afectación de las condiciones medioambientales y de carga que resisten.

El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y frecuencia de aplicación de carga, incluso por las propiedades del asfalto y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas.

Existen un gran número de ensayos para evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas, siendo el Marshall el más común en la práctica.

La ejecución y análisis de estos ensayos de laboratorio implica el empleo de equipos costosos, tiempos largos de ejecución, lo que hace en muchos casos la búsqueda de nuevos procedimientos y ensayos más económicos en menor tiempo, debido a esto se abre la

posibilidad de investigar el comportamiento de las mezclas asfálticas a partir de la evaluación de imágenes digitales.

El estudio de las mezclas asfálticas con procesamiento digital es un campo de la ingeniería que se ha venido desarrollando, buscando realizar una inspección y obtención de información de una forma más precisa y rápida

Los resultados del análisis de las mezclas asfálticas a través del procesamiento digital dan a conocer las características y propiedades de las mezclas asfálticas como ser el porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado que presenta la mezcla asfáltica.

Con los resultados de estas imágenes se puede plantear posibles soluciones ante los defectos que presente la mezcla asfáltica; esta es una metodología que se la puede realizar sin complicaciones ya que el equipo para esta metodología existe en nuestro medio sin necesidad de materiales costosos y es aplicable para diferentes mezclas asfálticas.

## **1.1. Planteamiento del problema**

### **1.1.1. Situación problemática**

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de pavimentos las cuales, están destinadas a ser la capa de rodamiento, así como a proteger a las capas granulares de base subyacente de las inclemencias climáticas y de la circulación de los vehículos.

Actualmente los pavimentos son sometidos a mayores volúmenes de tránsito, mayores cargas y condiciones climáticas extremas que afectan el desempeño de un pavimento, produciendo malestar y déficit en el ámbito social y económico; por lo tanto, la actuación de la mezcla asfáltica es de gran importancia para asegurar un pavimento resistente y durable a lo largo de su vida útil.

En los pavimentos flexibles los tipos de fallas que se presentan son piel de cocodrilo, grietas de contracción o de bloque, corrugaciones, ahuellamiento; las posibles causas pueden ser por la rigidización de la mezcla asfáltica en zonas de carga, por problemas de drenaje que afectan los materiales granulares, compactación deficiente de las capas granulares o asfálticas, deficiencias en la elaboración de la mezcla asfáltica sea por exceso de mortero en la mezcla o por deficiencia de asfalto en la mezcla.

La mejor forma de identificar las fallas del pavimento y determinar por qué se han producido, es mediante la conducción de un estudio; en él se debe identificar el tipo,

severidad y magnitud, también se debe tratar de determinar si el diseño del pavimento, la carga soportada, el agua, la temperatura, los materiales del pavimento o la construcción fueron la causa de la falla. Además de la inspección visual, pueden emplearse pruebas destructivas y no destructivas para determinar la condición estructural y las condiciones del material bajo la superficie del pavimento.

En las técnicas de reparación tenemos las actividades correctivas que son las que corrigen la deficiencia que se presenta en la estructura del pavimento después de que ha ocurrido el deterioro, como ser la reparación de espesor completo y reparación de espesor parcial; también las actividades preventivas son las que retardan o previenen la aparición de una falla con el fin de mantener una buena serviciabilidad, entre estas tenemos el sellado de grietas, bacheo superficial, bacheo profundo, sellos bituminosos, nivelación de bermas.

Debido a que se presentan estos problemas en los pavimentos es importante analizar y estudiar las mezclas asfálticas, sus propiedades volumétricas de la mezcla, así como la elección adecuada de los materiales, agregados y asfalto, ya que para tener un buen comportamiento de la mezcla asfáltica se necesita no solo que esté realizada con buenos materiales, además éstos deben estar combinados de manera que el comportamiento sea óptimo.

Para evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas se necesita de ensayos de laboratorio que implica el empleo de equipos costosos, tiempos largos de ejecución; además que son ensayos destructivos, por lo que se busca realizar la implementación de una metodología que sea más sencilla y no destructiva en corto tiempo y costo menor para poder evaluar las características y propiedades de las mezclas.

En nuestro medio no se realiza un buen análisis de las características y propiedades que desarrollan las mezclas asfálticas, tampoco se realiza un análisis de la mezcla asfáltica puesta en obra si cumple con las especificaciones con las que se diseñó; siendo estos motivos una de las causas por las que el pavimento tiende a fallar o deteriorarse a corto tiempo una vez puesto al servicio del usuario; es por esto que se busca aplicar esta metodología no destructiva para evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas y así evitar fallas en el pavimento.

### **1.1.2. Problema**

¿Si se aplica una metodología basada en imágenes digitales para evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas se podrá obtener las propiedades y características de las mezclas en forma no destructiva, sin necesidad de equipos costosos y largos tiempos de análisis?

### **1.2. Justificación**

El estudio de las mezclas asfálticas es importante ya que son las que reciben la incidencia directa de las cargas debiendo absorber la mayor parte de esa energía; por tanto, el desempeño (performance) de una mezcla asfáltica es de gran importancia para obtener un pavimento resistente y durable a lo largo de su vida útil.

Las mezclas deben ser diseñadas de tal forma que brinden una resistencia suficiente para soportar los esfuerzos inducidos por el flujo vehicular sin deformarse ni agrietarse, además de ser resistente a la intemperie, de tal forma que pueda cumplir con las exigencias mencionadas. Esto asegurará una superficie duradera de tal forma que brindará al usuario un viaje cómodo y seguro.

En la actualidad se ha apreciado los pavimentos con mezcla asfáltica; en carreteras y pistas, no siempre se encuentran en óptimas condiciones, presentando deterioros en el pavimento por lo que cada cierto tiempo, no muy largo, éstas se hallan en reparación, produciendo malestar y déficit en el ámbito social y económico.

En tal sentido, es importante realizar estudios y ensayos de laboratorio que evalúen el comportamiento futuro de las mezclas asfálticas, demostrando que son adecuadas para su utilización en las vías del territorio nacional.

En el comportamiento mecánico se evalúa la estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos de la mezcla; es necesario evaluar estas características para saber si esta mezcla asfáltica es adecuada.

El comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas está definido por la variación de la temperatura y frecuencia de aplicación de carga, incluso por las propiedades del asfalto y el agregado utilizado en la fabricación de las mismas.

La caracterización mecánica y dinámica de mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de pavimentos es compleja debido a la diversidad de los materiales, tamaños que la conforman y la afectación de las condiciones medioambientales y las cargas que reciben, es por esto que se necesitan múltiples ensayos de laboratorio para poder establecer los parámetros de diseño, construcción y mantenimiento de las vías.

Se pudo encontrar un gran número de ensayos de laboratorio que evalúan el comportamiento de mezclas asfálticas; la ejecución de estos ensayos de laboratorio implica el empleo de equipos costosos, tiempos largos de ejecución.

Es por esta razón que la implementación del procesamiento digital de imágenes reduce los costos y tiempos de análisis de una mezcla asfáltica, es una herramienta versátil ya que se puede utilizar para diferentes mezclas asfálticas y tiene un campo amplio de aplicación como sistema de control de calidad, análisis interno estructural o como herramienta adicional de diseño.

El análisis de las mezclas asfálticas a través del procesamiento digital representando las imágenes, se puede conocer las características internas de la mezcla y ante los resultados de las imágenes poder plantear posibles soluciones de esos defectos que presenten las mezclas asfálticas.

La ventaja de la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas utilizando el procesamiento digital de imágenes es un ensayo no destructivo y realizado en tiempo corto y costo menor además que es una metodología que se puede aplicar ya que no implica el uso de instrumentos que no existen en nuestro medio.

### **1.3. Alcance**

El alcance que tendrá este trabajo es la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica a través de imágenes digitales; es una metodología relativamente nueva en nuestro ámbito ya que esta implementación del procesamiento digital de imágenes en pavimentos busca reducir los costos y tiempo de análisis teniendo en cuenta que es un ensayo no destructivo y no implica el uso de instrumentos que no existen en nuestro medio.

Esta metodología podrá ser utilizada para controlar la calidad de las carpetas asfálticas de las carreteras, o como herramienta adicional al diseño buscando siempre la comodidad del usuario

Para este proyecto se evaluará 30 muestras de mezclas asfálticas de las calles urbanas de la ciudad de Tarija de diferentes años y de tramos carreteros de pavimento flexible ; los núcleos extraídos serán colocados al tomógrafo para obtener las imágenes bidimensionales para ser analizadas donde se podrá definir las características y propiedades de las mezclas asfálticas, el porcentaje de vacíos ,contacto agregado-agregado, para proceder a realizar la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico.

Inicialmente se presenta en la introducción, la justificación y situación problemática de realizar esta evaluación de las mezclas asfálticas mediante este procesamiento, determinando los objetivos los cuales serán alcanzados; se delimita el área de estudio, la población, muestra y muestreo.

Luego la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento, es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, basado en bibliografía existente sobre el campo de las mezclas asfálticas como ser sus componentes, características, propiedades su comportamiento y diseño de las mezclas señalando las normas vigentes dentro de las cuales se maneja esta investigación.

En la aplicación práctica, se describe los medios y criterios para los datos que se buscan dando a conocer la metodología de las imágenes digitales, su campo aplicativo y el procedimiento a seguir para su uso como un método evaluativo de mezclas asfálticas; para la cual se realizan ensayos normados por (AASHTO - ASTM) tanto para áridos, como para cementos asfálticos.

También se realiza el diseño de briquetas por el método Marshall con los mismos agregados y cemento asfáltico de las muestras extraídas de pavimentos flexibles; una vez obtenidos los núcleos extraídos son sometidos al equipo tomográfico para obtener las imágenes bidimensionales y determinar las características y propiedades de las mezclas asfálticas.

Finalmente se establece las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos tanto general como específicos del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta ampliación y ejecución de este trabajo.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar la evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas utilizando el procesamiento digital de imágenes y poder plantear posibles soluciones adecuadas en las mezclas asfálticas.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar un análisis teórico sobre los pavimentos y mezclas asfálticas.
- Describir las propiedades y características de las mezclas asfálticas en base a norma ABC.
- Ubicar los materiales a utilizar en la mezcla asfáltica en base a la disponibilidad en el medio
- Realizar la caracterización de los agregados pétreos y el cemento asfáltico mediante la norma ASTM y AASHTO
- Realizar la dosificación y elaboración de las mezclas asfálticas por el método Marshall, verificando que cumplan con lo establecido por la norma AASHTO.
- Obtener y analizar las imágenes digitales para evaluar el comportamiento de diferentes tipos de mezclas asfálticas aplicando tomografía computarizada.

## **1.5. Diseño metodológico**

### **1.5.1. Componentes**

#### **1.5.1.1. Unidad de estudio**

Pavimentos flexibles, ya que son aquellos cuyo revestimiento está compuesto por una mezcla constituida básicamente de agregados pétreos y ligantes asfálticos. El cual está formado por cuatro capas principales dependiendo de la disponibilidad de los materiales y del tráfico registrado; puede tener la ausencia de alguna capa.

### **1.5.1.2. Población**

Mezclas Asfálticas; con un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, con 5 % de polvo mineral y otro 5 % de ligante asfáltico, donde los agregados gruesos y finos deben ser de piezas durables de la misma naturaleza y carentes de recubrimientos adheridos indeseables; el filler, un material que al mezclarse íntimamente con el asfalto modifica algunas de las propiedades de la mezcla y el ligante asfáltico se seleccionará de acuerdo a las condiciones de clima, tránsito y estructurales del proyecto.

### **1.5.1.3. Muestra**

Evaluación del comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas en 30 muestras de tramos carreteros de pavimentos flexibles a los cuales serán calles urbanas elaboradas en diferentes años y tramos de carretera los cuales son Tarija-Puerta Chaco; Puerta Chaco - Puente Jarcas; Puente Jarcas - Piedra Larga; Piedra Larga - Canaletas.

Donde se evaluará 30 muestras de mezclas asfálticas a través de imágenes digitales que serán obtenidas de someter los núcleos extraídos a un equipo tomográfico que, realizando un análisis de estas imágenes nos permitirá determinar las características y propiedades de las mezclas asfálticas.

### **1.5.1.4. Muestreo**

Para la elaboración de las muestras de mezclas asfálticas el muestreo de áridos es de bancos regionales los cuales proporcionan material a los principales ejecutores de mezclas asfálticas en nuestra región, los cuales son San Blas, Santa Ana, para las calles urbanas de ciudad de Tarija (H.A.M) y agregados provenientes del río Canaletas para los tramos carreteros (SEDECA); los agregados gruesos (3/4"- 3/8"), (3/8"- N°4), se compondrán de piedra triturada o grava, que se compongan de piezas durables y carentes de recubrimientos adheridos indeseables; los áridos finos (N°4 - N°200) que son de la misma naturaleza que el árido grueso. En cuanto al cemento asfáltico se trabajará con cemento asfáltico convencional PROBISA 85/100 industria chilena el cual es usado para zonas donde el clima es templado.

## **1.5.2. Métodos y técnicas empleadas**

### **1.5.2.1 Método**

El método inductivo es un razonamiento que analiza una porción de un todo; parte de lo particular a lo general, va de lo individual a lo universal. Es decir, se utiliza el razonamiento para obtener conclusiones que parten de hechos particulares, aceptados como válidos para llegar a conclusiones cuya aplicación es de carácter general.

Se parte del análisis de ejemplos concretos que se descomponen en partes para posteriormente llegar a una conclusión. En ello se asemeja al método analítico descrito con anterioridad. En suma, las investigaciones científicas representan la síntesis de estudios y de investigaciones a lo largo de las cuales se van estableciendo conclusiones generales sobre determinados conocimientos.

En este proyecto se aplica el método de inducción, que se utiliza con la implementación de las imágenes digitales a través del equipo tomográfico donde se observa de manera directa e interiormente las mezclas asfálticas para definir las características y propiedades para con estos resultados obtenidos, llegar a una conclusión general de la implementación de esta metodología para evaluar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas, reduciendo costos y tiempo de análisis con la ventaja que es un ensayo no destructivo.

### **1.5.2.2 Técnicas**

La técnica experimental pretende una visión completa del trabajo a realizar al enfrentarse con una experiencia práctica, es decir, esta técnica está integrada por un conjunto actividades metódicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver, de la que se quiere obtener un resultado fiable que será dado a conocer mediante un informe.

Se utilizará la técnica experimental con ensayos de laboratorio que caracterizarán los materiales de las mezclas (agregados, cemento asfáltico); se procederá a diseñar las mezclas asfálticas con cemento asfáltico convencional; también se realizará la extracción de núcleos a los tres bolillos de pavimentos flexibles con los mismos componentes de las mezclas elaboradas ; los núcleos extraídos posteriormente serán sometidos al tomógrafo

para obtener las imágenes digitales de la estructura interna de las mezclas asfálticas que a partir del análisis de estas imágenes bidimensionales se obtendrá las características y propiedades de las mezclas. **(Hernandez Samperi R., 2006)**

#### 1.5.2.2.1. Medios e instrumentos

a) Para la caracterización de los agregados se necesita:

Figura 1.1: Horno eléctrico



Fuente: Elaboración propia

El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C

Figura 1.2: Balanza.



Fuente: Elaboración propia

Es usada para obtener los distintos pesos que se requiera en laboratorio; tiene una sensibilidad de 0.1 gr.

Figura 1.3: Juego de tamices.



Figura: Elaboración propia

El juego de tamices es utilizado para realizar el proceso del tamizado de los agregados en laboratorio.

Figura 1.4: Máquina de los Ángeles



Fuente: Elaboración propia

Este equipo es utilizado para determinar la resistencia de los áridos gruesos a la trituración

b) Para la caracterización del betún

Figura 1.5: Penetrómetro de asfaltos.



Fuente: Elaboración propia.

Sirve para medir la consistencia o dureza del cemento asfáltico en estudio.

Figura 1.6: Viscosímetro Saybolt.



Fuente: Elaboración propia

Con los cuales se determina la viscosidad del cemento asfáltico en estudio.

Figura 1.7: Copa abierta de Cleveland.



Fuente: Elaboración propia.

Con el cual se determina el punto de ignición o punto de llama del cemento asfáltico en estudio.

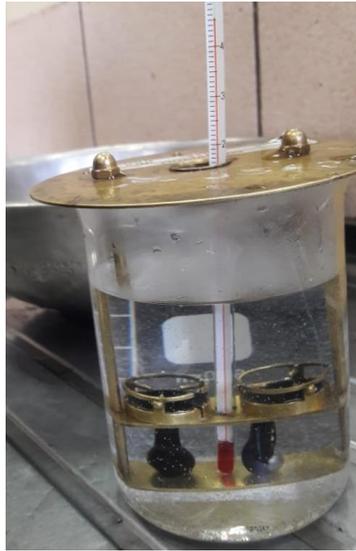
Figura 1.8: Ductilómetro.



Fuente: Elaboración propia

Con el cual se determina la ductilidad del cemento a una temperatura estándar de 25 °C.

Figura 1.9: Equipo anillo y bola



Fuente: Elaboración propia

Este equipo es para determinar la temperatura a la cual fluye un asfalto hasta cierto grado.

c) Preparación de los especímenes con el uso de la metodología Marshall

Figura 1.10: Moldes de compactación de especímenes.



Fuente: Elaboración propia

En estos moldes se vaciará la mezcla asfáltica creando las briquetas; el molde debe estar a una temperatura elevada de por lo menos 130 °C.

Figura 1.11: Pisón de compactación.



Fuente: Elaboración propia

Este compactador sirve para compactar las briquetas según especificaciones técnicas.

Figura 1.12: Prensa Marshall



Fuente: Elaboración propia

Para someter a las briquetas a una carga que determina la fluencia y estabilidad de las mezclas.

- d) Extracción de núcleos de proyectos de pavimentos flexibles; mediante el equipo extractor de muestras cilíndricas.

Figura 1.13: Extractor de núcleos.



Fuente: Elaboración propia

Este Extractor permite retirar la muestra ya cortada desde el fondo del corte.

- e) Se realiza la toma de las imágenes a los núcleos que son analizadas por el procesamiento digital basado en imágenes pixeladas

Figura 1.14: Equipo tomográfico.



Fuente: Elaboración propia

Se hará uso de este equipo clínico que proporcionará las imágenes digitales de la estructura interna de las briquetas.

### 1.5.2.3. Tratamiento estadístico.

#### 1.5.2.3.1. Estadística descriptiva.

La estadística Descriptiva es la técnica matemática que obtiene, organiza, presenta y describe un conjunto de datos con el propósito de facilitar su uso generalmente con el apoyo de tablas, medidas numéricas o gráficas (polígonos de frecuencia). Además, calcula los parámetros estadísticos como las medidas de centralización como son la moda, mediana, media de dispersión como el rango, la desviación estándar o típica, y la varianza que describen el conjunto estudiado.

#### Medidas de tendencia Central

**Moda.** - Es la categoría o puntuación que ocurre con mayor frecuencia en una distribución de datos. La moda para datos agrupados en tablas:

$$Mo = L_i + c * \left[ \frac{d_1}{d_1 + d_2} \right]_i$$

$L_i$  = Límite inferior del intervalo que contiene a la moda

$f_i$  = Mayor frecuencia absoluta simple

$f_{i+1}$  = Frecuencia absoluta inmediata superior

$$d_1 = f_j - f_{i-1}$$

$$d_2 = f_j - f_{i+1}$$

$c$  = Amplitud del intervalo que contiene a la mediana

**Mediana.** - Valor que divide a la distribución por la mitad. Esto es, la mitad de los que caen por debajo de la mediana y la otra mitad se ubica por encima de la mediana, esta refleja la posición intermedia de la distribución.

$$Me = L_{i-1} + \frac{\frac{N}{2} - F_{i-1}}{f_i} * a$$

Donde:

$L_{i-1}$  = Límite inferior del intervalo mediana

$a$  = Amplitud del intervalo mediana

$F_{i-1}$  = Frecuencia acumulada anterior al intervalo mediana

$f_i$  = Frecuencia absoluta del intervalo mediana

$N$  = Total de datos

**Media.** - Medida de tendencia central más utilizada y puede definirse como el promedio de una distribución.

Es calculada a partir de la suma de todos los valores dividida por el número de muestras, expresado en la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

La fórmula simplificada de la media es:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Fórmula para el cálculo de la media a partir de datos agrupados de una distribución de frecuencias:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i * T_i}{n}$$

Donde:

$F_i$  = Frecuencia de la I-esima clase

$T_i$  = Marca de clase de la I-esima clase

Se establecen diagramas de dispersión que nos permiten tener una idea bastante aproximada de la relación entre dos variables, a través de la cual podemos establecer una regresión de datos.

### **Medidas de Dispersión**

**Varianza.** - Mide la dispersión media de los valores de una variable con respecto a la media, y es calculada mediante la siguiente ecuación.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^m (x_i - \bar{x})^2 * f_i}{n}$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza

$x_i$  = Valor de la variable x

$\bar{x}$  = Media aritmética

$f_i$  = Frecuencia absoluta de la observación  $x_i$

$n$  = Tamaño de la muestra

$m$  = Numero de agrupamientos o intervalos

**Desviación estándar.** - La desviación típica o desviación estándar (denotada con el símbolo  $\sigma$  o  $s$ , dependiendo de la procedencia del conjunto de datos) es una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

La desviación estándar se puede utilizar para establecer un valor de referencia para estimar la variación general de un proceso.

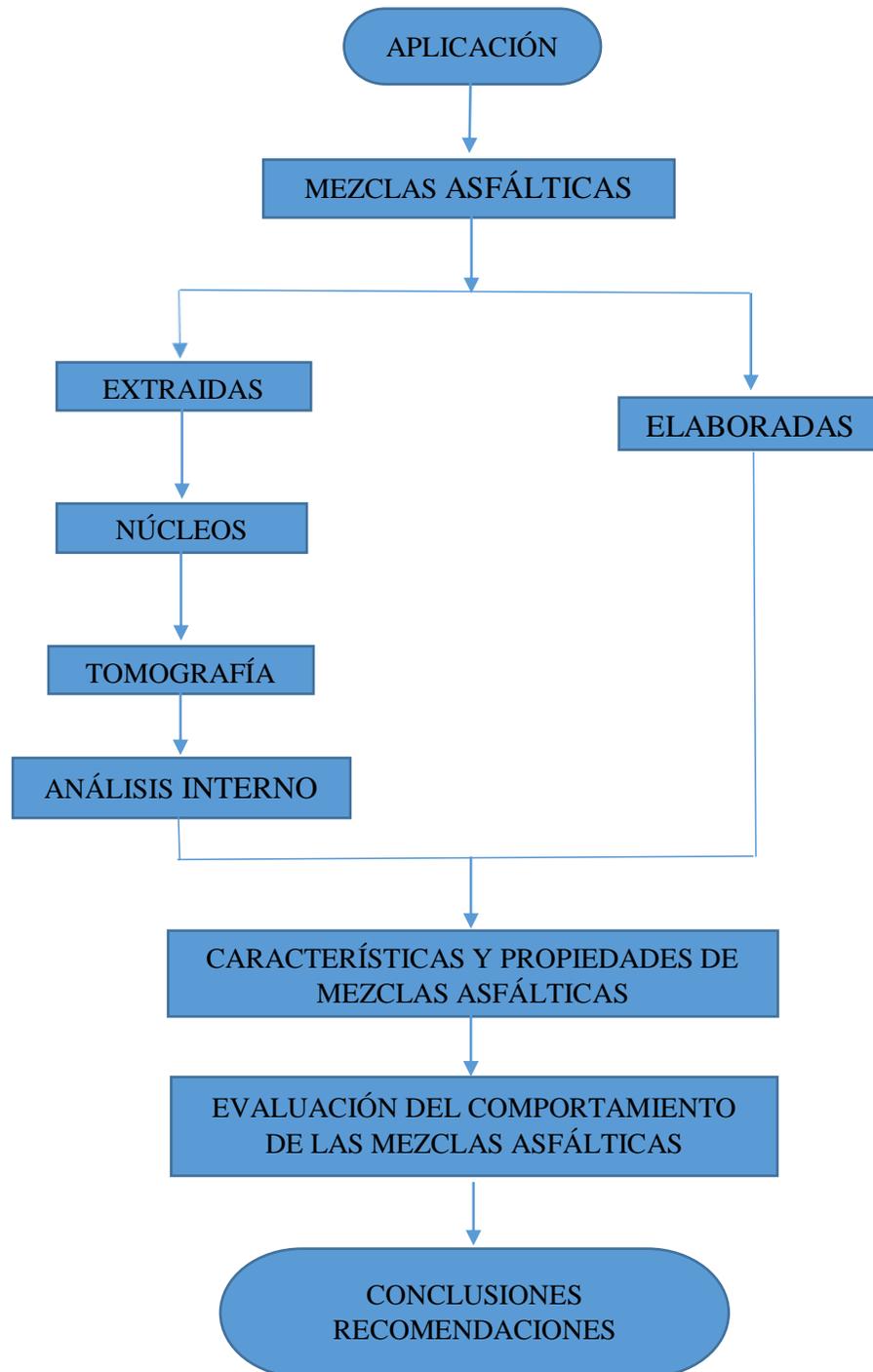
$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza

$\sigma$  = La desviación típica

### 1.5.3. Procedimiento de aplicación



La ubicación del área de estudio está en calles urbanas de la ciudad de Tarija de diferentes años y tramos carreteros.

Se realizará briquetas por el diseño Marshall con agregados de las distribuidoras San Blas, Santa Ana y río Canaletas, los áridos gruesos (3/4"- 3/8"), (3/8"- N°4), los áridos finos (N°4 - N°200) y polvo mineral Filler (pasante el tamiz N°200); se utilizará cemento asfáltico convencional PROBISA 85/100 industria chilena; una vez determinado el porcentaje óptimo del asfalto se realiza el compactado de los especímenes.

Para la caracterización de áridos y cementos asfálticos se hará uso de los equipos con los que cuenta el laboratorio de suelos y asfalto de la U.A.J.M.S, los cuales están regidos bajo normas (AASHTO y ASTM).

Se procederá a la extracción de núcleos a los tres bolillos de calles urbanas (H.A.M) y de tramos carreteros (SEDECA); el extractor de testigos permite retirar la muestra ya cortada desde el fondo del corte; el equipo será otorgado por el laboratorio de asfaltos de U.A.J.M.S.

En número de muestras de mezclas asfálticas (núcleos extraídos) será 30 de las cuales se obtendrá 2 cortes en cada una de ellas, es decir se tendrá 60 imágenes para analizar.

Para la obtención de las imágenes se llevará las muestras para obtener las imágenes haciendo el uso de un tomógrafo el cual es utilizado en el campo médico, utiliza una fuente motorizada de rayos "x" que gira alrededor de una abertura circular de una estructura en forma de dona llamada Gantry. Durante un escaneo por (T.C.), el objeto permanece inmóvil en una mesa que se mueve lentamente a través del Gantry, mientras que el tubo de rayos "x" gira alrededor del objeto, disparando haces angostos de rayos "x" a través del objeto. Cuando los rayos "x" salen del objeto, son captados por los detectores y transmitidos a una computadora.

Una vez obtenidas las imágenes digitales, estas son importadas al programa de análisis de imágenes para poder evaluarlas que nos permitirá determinar las características y propiedades de las mezclas asfálticas; el porcentaje de vacíos, el porcentaje de vacíos del agregado mineral, contacto agregado - agregado y el comportamiento dinámico de la mezcla asfáltica.

Concluida la etapa de obtención de datos buscados de las briquetas de laboratorio y núcleos se analiza los datos aplicando estadística teniendo 30 datos como resultado; como son mezclas para la misma ciudad se hallará media, varianza desviación estándar de dichos datos.

Terminando este procedimiento se establece conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos.

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DE IMÁGENES DIGITALES EN COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

#### **2.1. Definición de pavimentos**

Un pavimento puede definirse como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las terracerías (subrasante) y la superficie de rodamiento, cuyas principales funciones son proporcionar una superficie de rodamiento uniforme de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, al intemperie y otros agentes perjudiciales, así como de transmitir adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que esta no se deforme de manera perjudicial .

Los pavimentos se clasifican tradicionalmente en dos tipos básicos: pavimentos rígidos y flexibles, denominados así según el tipo de material utilizado.

El pavimento se define como una estructura de múltiples capas de espesores finitos y de materiales apropiados, construido sobre una superficie final de terraplén, destinado a resistir esfuerzos producidos por el tráfico de vehículos y por el clima al cual se encuentra sometido: buscando mejor las condiciones de rodadura propiciando siempre la comodidad del usuario, seguridad y economía.

En el caso de pavimentos rígidos en los que se emplean placas de concreto portland, para pavimentos flexibles se usan materiales provenientes de la refinación del petróleo por lo que también son llamados pavimentos asfálticos.

#### **2.2. Clasificación de pavimentos**

Los pavimentos se clasifican tradicionalmente en dos tipos básicos: pavimentos rígidos y flexibles denominados así según el tipo de material utilizado

En el caso de pavimentos rígidos son aquellos en los que se emplean placas de concreto portland; para pavimentos flexibles se usan materiales provenientes de la refinación del petróleo por lo que también son llamados pavimentos asfálticos.

##### **2.2.1. Pavimentos rígidos**

Están formados por una losa de concreto colocada directamente sobre la explanada o sobre una capa de base granular.

Aparte de los tipos de pavimentos ya citados existe actualmente el llamado semirrígido que es, esencialmente, un pavimento flexible a cuya base se le ha dado una rigidez alta por la adición de cemento o asfalto.

### **2.2.2. Pavimentos flexibles**

Consisten en una superficie de desgaste o carpeta relativamente delgada construida sobre unas capas base y sub-base, apoyándose este conjunto sobre la subrasante compactada, de manera que la sub-base y superficie de desgaste o carpeta son las componentes estructurales de este tipo de pavimento.

El pavimento flexible debe proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente a la acción del tránsito, a la intemperie y otros agentes perjudiciales, así como transmitir a las terracerías los esfuerzos por las cargas del tránsito.

Entre las características principales que debe cumplir un pavimento flexible se encuentran las siguientes:

**Resistencia estructural.** - Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura. En los pavimentos flexibles se consideran los esfuerzos cortantes, también se tiene los producidos por la aceleración, frenaje de los vehículos y esfuerzos de tensión en los niveles superiores de la estructura.

**Durabilidad.** - La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desee dar al camino depende de la importancia de este. Hay veces que es más fácil hacer reconstrucciones para no tener que gastar tanto en el costo inicial de un pavimento.

**Requerimiento de conservación.** - Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que proveer el crecimiento futuro. Se debe tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes.

**Comodidad.** -Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto. La seguridad es muy importante al igual que la estética. **(Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos, 2006)**

### 2.2.2.1 Composición del pavimento flexible

Los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

Figura 2.1: Sección transversal del pavimento flexible.



Fuente: Elaboración propia

**Subrasante.** - Generalmente es el terreno natural en el cual se apoya toda la estructura del pavimento, es decir, que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporte de la subrasante es un factor básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas del pavimento. Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo del terraplén.

**Capa subbase.** - Es la capa de material que se construye directamente sobre la terracería y su función es:

Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base. Proteger a la base aislándola de la terracería, ya que, si el material de la terracería se introduce en la base, puede sufrir cambios volumétricos generados al cambiar las condiciones de humedad dando como resultado una disminución en la resistencia de la base. Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad. Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.

**Capa base.** - Es la capa de material que se construye sobre la subbase. Los materiales con los que se construye deben ser de mejor calidad que los de la subbase y su función es tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos.

**Capa de rodadura o revestimiento asfáltico.** - En el caso de los pavimentos flexibles, está constituida por un material pétreo, al que se adiciona un producto asfáltico que tiene por objeto servir de aglutinante. Esta capa transmite las cargas inducidas por el tráfico hacia la capa de base en la que se apoya, además que provee una superficie adecuada para el rodamiento del tráfico

Impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte. Proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda. Reducir las tensiones verticales que la carga, por eje, ejerce sobre la capa base, para poder controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

### **2.3. Mezcla asfáltica**

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en un agregado pétreo. Las proporciones relativas del material asfáltico y los agregados pétreos determinan las propiedades físicas de la mezcla.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico.

Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

#### **2.3.1. Funcionalidad de las mezclas asfálticas en los pavimentos**

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas del pavimento

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura.

Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga.

### 2.3.2. Componentes de la mezcla asfáltica

Los componentes de una mezcla asfáltica deben cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 2.1: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico convencional

N°	Características	Detalle		Exigencia
		AASHTO	ASTM	
1	Penetración a 25°C	T-49-96	D-4	85-100
2	Copa abierta de Cleveland punto de inflamación	T-79-96	D-1310-00	>232
3	Viscosidad saybol furol a 135°C	T-72	D-102	> 85seg.
4	Solubilidad en tricloro estileno %	T-44	D-2042	>a 99%
5	Ductilidad a 25°C	T-229-97	D-71	> a 100 cm
6	Ensayo de la mancha heptaxilol, (20% máximo de xilo)	T-102	-	(-) Negativo
7	Ensayo de horno película delgada	T-240-06	D-175	< a 1
8	Penetración del residuo de pérdida, por calentamiento % original	T-49	D-5	> a 50
9	Porcentaje de agua	T-55	-	< a 0,2

Fuente: Especificaciones técnicas del fabricante

Tabla 2.2: Especificaciones de los agregados pétreos de mezclas bituminosas

Requisitos de los Agregados Pétreos para Tratamientos y Mezclas							
tipo de tratamiento o mezcla	Partículas fracturadas mecánicamente	Desgaste de los ángeles	Perdidas en ensayo de solidez		Índices de Aplanamiento y Alargamiento	Equivalente de Arena	Contenido de Impurezas
mezcla abierta en caliente	75 % min	12 % máx.			35 % máx.	50 % min.	0,5 % máx.
Mezcla densa en caliente agregado grueso agregado fino gradación	75 % min	35 % máx.	12 % máx.	18 % máx.	30 % máx.	50 % min.	0,5 % máx.
mezcla discontinua en caliente	75 % min	25 % más.	12 % máx.	18 % máx.	25 % máx.	50 % min.	0,5 % máx.
mezcla drenante	75 % min	25 % máx.					0,5 % máx.

Fuente: Vías de comunicación (Crespo Villalaz)

### **2.3.2.1. Agregados pétreos:**

Los agregados pétreos ocupan la mayor parte de la totalidad del volumen de la mezcla asfáltica. Son materiales granulares de composición mineralógica que se combinan en diferentes tamaños y proporciones.

El comportamiento que tendrá un pavimento flexible se verá altamente influenciado por el tipo de selección apropiada del agregado, esto debido a que el agregado proporciona la mayoría de las características de capacidad soportante.

Existen términos que se usan para hacer referencia a fracciones de agregados con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos términos se describen a continuación. **(Ingeniería de pavimentos evolución Estructural, obras de mantenimiento nuevas Tecnologías, 2006)**

**Agregado grueso.** - Es todo aquel agregado que se retiene en el tamiz N°8.

**Agregado fino.** - Es aquel agregado que pasa el tamiz N° 8. Este agregado se puede dividir a su vez en relleno mineral y polvo mineral.

**Relleno mineral.** -Es aquel agregado fino que pasa el tamiz N° 30.

**Polvo mineral (filler).** -Es aquel agregado fino que pasa el tamiz N° 200. Es necesaria su incorporación para el relleno de vacíos. Además, funciona como espesante de la mezcla asfáltica o como mejorador de adherencia a la mezcla.

### **2.3.2.2. Ligantes asfálticos**

Material cementicio de color café oscuro-negro en el cual los constituyentes predominantes son betunes que se encuentran en las naturales o pueden ser obtenidos luego del procesamiento del pétreo.

Existe una amplia variedad de ligantes asfálticos. Para la pavimentación se utilizan cuatro tipos de ligantes:

Cementos asfálticos.

Asfaltos diluidos o “cutback”

Emulsiones asfálticas.

Asfaltos Modificados

### **2.3.2.2.1. Los Asfaltos**

Los asfaltos son componentes naturales de muchos petróleos en los cuales se encuentran disueltos, pudiendo contener otros materiales como oxígeno, nitrógeno de azufre, en pequeñas proporciones.

Diferentes tipos de asfaltos: La mayor parte del asfalto que se emplea hoy en día América proviene de la refinación del petróleo. El asfalto refinado se produce en una gran variedad de tipos desde los sólidos, duros y quebradizos hasta los fluidos casi tan líquidos como el agua. La forma semisólida conocida como cemento asfáltico es el material básico y puede considerarse como una combinación de asfalto duro y aceites no volátiles del petróleo.

**Asfalto natural.** - Es un asfalto que se obtiene por el proceso natural de evaporación o destilación y se forma cuando el petróleo crudo sube hasta la superficie de la tierra a través de grietas. Ya en la superficie, la acción conjunta del sol y el aire separa los aceites ligeros y los gases dejando un residuo que es el asfalto, el cual generalmente está impregnado con un cierto porcentaje de arcilla o arena muy fina que se adhiere al petróleo crudo durante el trayecto ascendente por las grietas, a la superficie.

**Asfalto refinado con vapor.** -Es el asfalto que se refina en presencia de vapor durante el proceso de destilación.

**Asfalto oxidado o soplado.** -Es aquel asfalto al cual se ha modificado alguna de sus características naturales, debido a que se le ha inyectado aire a temperatura elevada durante su destilación

**Asfalto refinado.** -Es cualquier asfalto sometido a un proceso de refinación.

**Cemento asfáltico.** -Es un asfalto refinado por destilación al vapor de los residuos más pesados del proceso de fraccionamiento, continuándose la destilación hasta obtener la penetración deseada.

### **2.3.3. Clasificación de las mezclas asfálticas**

- **Por fracciones de agregado pétreo empleado:**

Masilla asfáltica. - Polvo mineral más ligante.

Mortero asfáltico. - Agregado fino más masilla.

Concreto asfáltico. - Agregado grueso más mortero.

Macadam Asfáltico. - Agregado grueso más ligante asfáltico.

- **De acuerdo a la granulometría:**

Mezclas continuas. - Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Mezclas discontinuas. - Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

- **De acuerdo a la proporción de vacíos en la mezcla:**

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

Mezclas cerradas o densas. - La proporción de vacíos no supera el 6 %.

Mezclas semi-cerradas o semi-densas. - La proporción de vacíos esta entre el 6 % y el 10%.

Mezclas abiertas. - La proporción de vacíos supera el 12 %.

Mezclas porosas o drenantes. - La proporción de vacíos es superior al 20 %.

- **De acuerdo al proceso constructivo utilizado:**

Mezclas asfálticas en caliente.-Consiste en una combinación de agregados uniformemente mezclados recubiertos por ligante asfáltico.

Para secar los agregados y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico como para lograr una adecuada trabajabilidad y mezclado, tanto el agregado como el asfalto deben ser calentados antes del mezclado, de ahí el término de mezcla en caliente; son fabricadas en un rango de 150 grados centígrados de temperatura y su puesta en obra también es a temperaturas superiores a los ambientes, caso contrario, estas no podrían ser extendidas y menos aún compactarse adecuadamente.

Mezclas asfálticas en frío. - El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

- **De acuerdo el tamaño de agregado pétreo:**

Mezclas gruesas. - Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.

Mezclas finas. -También llamadas micro aglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezcla formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser doble o triple del tamaño máximo.

- **Por la estructura del agregado pétreo:**

Mezcla con esqueleto mineral. -Poseen un esqueleto mineral resistente; su componente de resistencia se debe al razonamiento interno de los agregados es notable.

Mezclas sin esqueleto mineral. - No posee un esqueleto mineral resistente; la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

#### **2.3.4. Propiedades de las mezclas asfálticas**

Cada tipo de mezcla asfáltica tiene propiedades intrínsecas diferentes, por lo que sus campos de aplicación también lo son. En principio, no es posible proyectar una mezcla que satisfaga plenamente todas las propiedades, debido a que algunas de ellas son contrapuestas y porque la importancia de unas u otras depende de la funcionalidad y estructura del pavimento. Las buenas mezclas asfálticas trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas.

Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad del pavimento de mezcla asfáltica, estas incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento. Las principales propiedades de las mezclas asfálticas son las siguientes:

**Estabilidad.** - La estabilidad es la primera característica que debe tenerse en cuenta en toda mezcla asfáltica, ya que ésta tiene la capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas de tránsito sin producir deformaciones excesivas. Se dice que un pavimento es estable cuando este es capaz de mantener su forma bajo las cargas repetitivas de tráfico.

Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para soportar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exigen las condiciones de tránsito.

Valores muy altos de estabilidad indican la presencia de un pavimento demasiado rígido y por lo tanto menos durable de lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna en las partículas de agregado que está relacionada con las características propias de los agregados pétreos, tales como su forma y textura superficial.

**Durabilidad.** - La durabilidad de una mezcla asfáltica tiene como habilidad resistir efectos tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación) y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, tránsito o una combinación de ambos. Generalmente la durabilidad de una mezcla asfáltica puede ser mejorada de tres formas:

Utilizando la mayor cantidad de asfalto posible.

Usando una graduación densa de agregado resistente a la separación y diseño.

Compactando la mezcla asfáltica para obtener la máxima impermeabilidad.

Una mayor cantidad de asfalto aumenta la durabilidad debido a que las películas gruesas de asfalto no se envejecen o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas.

En consecuencia, el asfalto retiene por más tiempo sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua.

**Flexibilidad.** - Es la capacidad de una mezcla asfáltica para acomodarse sin que se produzcan agrietamiento por movimiento y/o asentamientos graduales de la sub-rasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico, debido al fenómeno de asentamiento que sufren la mayoría de carreteras en las capas inferiores de la estructura de pavimentos, cuando estas son sometidas a cargas de tránsito; en caso contrario, cuando se producen expansiones debido a la temperatura. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es generalmente más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

Se debe prever que las mezclas asfálticas puedan extenderse en capas de reducido espesor (menor a 10 cm.) o sobre superficies de rodamiento ya existentes, por lo que estas deben poseer la suficiente flexibilidad para que no se rompan o fisuren con excesiva rapidez (fatiga prematura).

**Impermeabilidad.** - La impermeabilidad de una mezcla asfáltica es la resistencia al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento; la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad. El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas asfálticas compactadas, todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras poseen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptado siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

**Trabajabilidad.** - La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Cuando la trabajabilidad es mala puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado utilizado y la granulometría.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla asfáltica, como en curvas pronunciadas, tapas de alcantarillas y obstáculos similares.

**Resistencia al deslizamiento.** - La resistencia al deslizamiento de una mezcla asfáltica tiende a minimizar el resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para lograr una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en lugar de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento, fenómeno conocido como hidropneumático.

La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de graduación abierta, con un tamaño máximo de 9.5mm (3/8") – 12.5mm (1/2").

Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento bajo tráfico. Se conoce que los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos.

**Resistencia a la fatiga.** - La resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica es la resistencia a la flexión repetida bajo cargas de tránsito. Estudios han demostrado que los vacíos y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga, por lo que a medida que aumenta el porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica, ya sea por diseño o por falla de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Así mismo un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente, tiene menor resistencia a la fatiga.

Se dice que el comportamiento de la mezcla asfáltica frente a las bajas temperaturas y altas velocidades, es fundamentalmente elástico, pero la repetición de cargas generalmente muy inferiores a la de rotura, produce un agotamiento progresivo por fatiga del material. La fatiga se traduce en un aumento de las deformaciones elásticas en superficie y cuando se llega a un avanzado estado de la misma se pueden observar agrietamientos generalizados denominados comúnmente piel de cocodrilo. **(Pavimentacion Asfáltica Formacion Básica para ingenieros, 2008)**

### **2.3.5. Características de las mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas preparadas en laboratorios deben ser analizadas para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento, determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Dentro de las principales características que se pueden mencionar que están presentes en una mezcla asfáltica de calidad tenemos:

Densidad

Vacíos de Aire

VMA (Vacíos en el Agregado Mineral)

Contenido de Asfalto

VFA (Vacíos Llenos de Asfalto)

## Estabilidad y flujo

**Densidad.** - La densidad de una mezcla asfáltica afecta a la mayoría de las pruebas de estabilidad; sin embargo, la estabilidad máxima no ocurre siempre a la densidad máxima determinada antes de la prueba. Las temperaturas a las cuales se determinan la densidad y la estabilidad, generalmente, no son iguales. La densidad de una mezcla asfáltica determina el grado de compactación del pavimento y esto nos indica si la compactación fue la adecuada en el proyecto.

Cabe mencionar que tanto la densidad como los vacíos de aire se encuentran relacionados entre sí, por lo que son inversamente proporcionales, mientras la densidad sea menor, el porcentaje de vacíos en la mezcla aumentará, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua, mientras que si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrará en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura más durable.

**Vacíos de aire.** - Los vacíos de aire en una mezcla asfáltica son todos aquellos espacios de aire que se encuentran entre las partículas de agregados pétreos con asfalto, una vez la mezcla asfáltica ya fue compactada.

El principal uso que tienen los vacíos de aire en una mezcla asfáltica es que es uno de los parámetros en los métodos de diseño y para la evaluación de la compactación en los diferentes proyectos de compactación

La durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor será la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona conductos a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire y causar deterioro.

**Vacíos en el agregado mineral (VAM).** - Los vacíos en el agregado mineral son aquellos que están definidos por el espacio que se encuentra entre las diferentes partículas de agregado de la mezcla que ya han sido compactadas, esto incluye los vacíos de aire antes mencionados y el contenido de asfalto, los cuales se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

De una manera más fácil se puede expresar como el volumen inter granular de vacíos entre partículas del agregado de una mezcla asfáltica caliente compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo). Se entiende como el porcentaje del volumen total del espécimen.

**Contenido de asfalto.-** El contenido de asfalto es una de las principales características que debe tener la mezcla asfáltica, ya que si se agrega poca cantidad de la que regularmente es, la mezcla podría resultar con una apariencia seca, granular, de recubrimiento defectuoso y los rodillos no la compactarían de una forma satisfactoria, mientras que si el contenido de asfalto es en exceso la mezcla asfáltica se vuelve densa y flexible por lo que la carpeta de rodadura puede llegar a sufrir ondulaciones en el terreno y puede disminuir su resistencia.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran parte de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Es decir, entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados de gran tamaño) exigen menos asfalto debido a que poseen menor área superficial total.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado.

**Vacíos llenos de asfalto (VFA).** - Es toda aquella porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la porción que resulta de quitarle el volumen de vacíos de aire al volumen de vacíos en agregado mineral.

En otras palabras, podemos mencionar que los vacíos llenos de asfalto son la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene lígate asfáltico.

**Estabilidad y flujo.** - La norma AASHTO T 245 establece el procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo de una mezcla. En ella se define como estabilidad, a la

carga máxima que puede soportar una probeta hecha de la mezcla en cuestión, al ser comprimida en los cabezales de prueba. El flujo, es el valor de la deformación que sufre la probeta mientras es cargada.

Se necesita un valor equilibrado de estabilidad, pues un valor alto pronostica una baja durabilidad, mientras que un valor muy bajo podría indicar que la mezcla es muy susceptible al ahullamiento.

### **2.3.6. Factores que deben controlarse en las mezclas asfálticas**

Para que una carpeta sea estable, duradera, impermeable y antiderrapante, se deben controlar los siguientes factores:

**Granulometría.** - Existen varias composiciones granulométricas del material pétreo, de acuerdo a las características de la obra y a la especificación técnica utilizada. Las mezclas con un contenido de partículas pétreas de mayor tamaño tienen mayor estabilidad. El tamaño máximo de las partículas no debe ser mayor a  $2/3$  del espesor de la carpeta.

**Contenido de asfalto.** - El contenido óptimo para la preparación de la mezcla debe ser el necesario para cubrir con una película de asfalto la superficie de las partículas pétreas sin llenar completamente los vacíos ya que éstos deben ser llenados con las partículas más finas.

Por una parte, la mezcla debe contener un porcentaje mínimo de vacíos para evitar las exudaciones del asfalto, que pueden provocar la formación de surcos u ondulaciones; por otra parte, deberá tener un porcentaje máximo de vacíos, ya que, si este valor se excede, se puede ocasionar el endurecimiento del asfalto por efecto de los agentes atmosféricos, dando como resultado una carpeta quebradiza.

**Consistencia y calidad del cemento asfáltico.** - Se debe elegir el cemento asfáltico más adecuado a las condiciones climatológicas del lugar donde se encuentra la obra. Un asfalto muy duro puede dar lugar a un pavimento quebradizo con problemas de desintegración y exceso de agrietamientos. En Cochabamba el cemento asfáltico más comúnmente usado es el de penetración 85-100. (**Asfalto y Pavimentación, 2013**)

### **2.3.7. Diseño de las mezclas asfálticas**

El diseño de las mezclas asfálticas para pavimentación, como cualquier diseño de ingeniería de materiales, es cuestión de selección y proporciones de materiales para

obtener cualidades y propiedades deseadas una vez finalizada la construcción, el objetivo general es una mezcla y graduación de agregados económicos (dentro de las exigencias de las especificaciones) y un contenido de asfalto adecuado que produzca una mezcla que posea:

Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de las partículas del agregado e impermeabilización y trabazón de las mismas bajo una adecuada compactación

Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requisitos de servicio y demandas de tráfico sin deformación o desplazamientos.

Cantidad de vacíos en la mezcla total compactada suficiente para evitar el afloramiento, la exudación y la pérdida de estabilidad

Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

#### **2.3.7.1. Métodos de diseño de las mezclas asfálticas**

Diseñar las mezclas asfálticas tiene como objetivo el lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio; los comúnmente más utilizados son el método Marshall, Hveem, Superpave siendo el primero el más común en la práctica.

##### **2.3.7.1.1. Método Marshall**

###### **Consideraciones preliminares**

El método Marshall es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que utiliza cemento asfáltico y agregados de granulometría cerrada o fina, con un tamaño máximo nominal de 25 mm (1") o menor. Se puede usar tanto para diseño de laboratorio como para el control de la mezcla durante la pavimentación.

Los aspectos principales del ensayo son el análisis densidad - vacíos y el ensayo de estabilidad fluencia, en muestras de mezclas asfálticas compactadas.

El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (especímenes) de 2 y 1/2" de espesor por 4" de diámetro (64 x 102 mm).

Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas: El tipo y grado del asfalto, de acuerdo al tipo de agregado y las condiciones climáticas.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (especímenes), con distintos porcentajes de asfalto cuyo rango de variación no debe ser mayor a 0,5%; como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo de contenido de asfalto estimado.

En la práctica se observa que el contenido óptimo de asfalto se encuentra alrededor del 6 %, con referencia al peso de los agregados pétreos; mayores porcentajes deben conducir a una verificación cuidadosa del diseño de la mezcla.

Para verificar la idoneidad de los datos se deben hacer tres muestras (especímenes) por cada contenido de asfalto; generalmente para un diseño, se deben tomar 6 porcentajes de asfalto diferentes, por lo cual se requerirán 18 especímenes.

Aproximadamente para cada espécimen, se necesitan 1200 gr. de agregados, por lo cual la cantidad representativa de los agregados, debe tener un peso mínimo de 29 kg (65 lb). Además, se requerirá aproximadamente un galón de asfalto.

El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos.

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente; utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto.

La estabilidad se determina empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo a la muestra a esfuerzos de compresión diametral a una temperatura de 60°C (140°F). La aplicación de esfuerzos y la rotura de las muestras se consiguen con un dispositivo especialmente proyectado para las pruebas de estabilidad.

El valor de estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. El valor de estabilidad es un índice de la calidad del agregado.

El contenido óptimo de asfalto se determina a través de la media aritmética de los porcentajes que llevan a:

La máxima estabilidad.

La máxima densidad de la mezcla.

Al volumen de vacíos de aire especificado.

Esta media debe ser verificada en relación al valor de la fluencia y a los vacíos del agregado mineral (VAM), a fin de asegurar que la mezcla contenga un volumen de asfalto (Vb) suficiente sin que el volumen de vacíos de aire (Va) sea reducido a un valor inaceptable. Si no se cumplen las especificaciones, la granulometría del agregado debe ser modificada. (**Aspecto de diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas, 2004**)

### **Granulometría para el diseño:**

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior); las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 2.3 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D3515.

Tabla 2.3: Graduación para mezclas cerradas (ASTM D3515)

<b>Mezclas cerradas</b>		
<b>Abertura de malla</b>		<b>Tamaño máximo nominal del agregado</b>
<b>N°</b>	<b>mm.</b>	<b>3/4 plg</b>
2 1/2"	63,000	-
2"	50,000	-
1 1/2"	37,500	-
1"	25,000	100
3/4"	19,000	90 - 100
1/2"	12,500	-
3/8"	9,500	56 - 80
N°4	4,750	35 -65
N°8	2,360	23 - 49
N°16	1,180	-
N°30	0,600	-
N°50	0,300	5 - 9
N°100	0,150	-
N°200	0,075	2 - 8

Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas (CIATEC)

### **Procedimiento de diseño Marshall (AASHTO T245-97)**

Los agregados y asfaltos presentan diferentes características las cuales tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades.

Una vez efectuado lo anterior, se procede con la preparación de los ensayos:

**Numero de muestras:**

Para la determinación óptima de asfalto, este debe ser primeramente estimado. Se destinan unas series de muestras de prueba para distintos rangos de contenidos de asfalto que se incrementa de 0,5 %.

**Preparación de los agregados:**

Los agregados son secados hasta peso constante de 105°C a 110°C; se recomiendan las fracciones: 25,4 a 19 mm (1" a 3/4") 19 a 9,5 mm (3/4" a 3/8"), 9,5 a 4,75 mm (3/8" a N°4), 4,75 a 2,36 mm (N°4 a N°8) y pasando 2,36 mm. (N°8).

**Temperatura de mezclado y compactación:**

Las temperaturas seleccionadas para el mezclado y la compactación, deben ser las que permiten una viscosidad de mezclado de 170  $\pm$ 20 centistokes y viscosidad de compactación de 280  $\pm$ 30 centistokes.

**Preparación del molde y el pisón de compactación:**

El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.

Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre calentados Marshall como preparación para la compactación, los cuales también son calentados para que no se enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.

Los especímenes son compactados mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada.

Tan pronto como el espécimen se enfríe a temperatura ambiente se desmolda y determina su espesor luego proceda a determinar su densidad y espesor.

**Especificaciones de la metodología:**

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se explican en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas y

calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 2.4 y Tabla 2.5).

Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla. (Vías de Comunicación, 2007)

Tabla 2.4: Especificaciones Marshall de diseño

Criterio de diseño Marshall	Tráfico liviano		Tráfico mediano		Tráfico pesado	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Compactación golpes	35		50		75	
Estabilidad						
Newton	3336		5338		8006	
Libras	750		1200		1800	
Fluencia 0,25 mm (0,01")	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% vacíos llenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: Vías de comunicación (Crespo Villalaz)

Tabla 2.5: Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral.

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in.	3,0	4,0	5,0
1,18	N° 16	21,50	22,50	23,50
2,36	N° 8	19,00	20,00	21,00
4,75	N° 6	16,00	17,00	18,00
9,50	3/8	14,00	15,00	16,00
12,50	1/2	13,00	14,00	15,00
19,00	3/4	12,00	13,00	14,00
25,00	1,0	11,00	12,00	13,00
37,50	1,5	10,00	11,00	12,00

Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas (CIATEC)

### 2.3.7.1.2. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

### **Determinación de la gravedad específica**

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la Norma (ASTM D1188), gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas empleando parafina; o (ASTM D2726), gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes secos.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la Norma (ASTM D1188), en caso contrario, se recurre a la Norma (ASTM D2726).

### **Prueba de estabilidad y flujo:**

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  ( $140^{\circ}\text{F} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$ ) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Con el equipo de prueba listo, se removerá el espécimen de prueba del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga.

Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51mm (5") por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newton (lb) requerido para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100") será el valor del flujo Marshall.

### **Análisis de densidad y vacíos:**

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Se calculará un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA). (**Agregado Grueso en Caliente (Método Marshall ASTM D1559), 2009**)

## **2.4. Comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas**

### **Comportamiento mecánico:**

Una estructura conformada por carpeta asfáltica, base y sub base soporta esfuerzos de tracción debajo de la carpeta asfáltica y de compresión en nivel de las otras etapas.

Los esfuerzos horizontales se disipan a través de la carpeta asfáltica pasando de un valor positivo a negativo, esta condición origina esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. Los esfuerzos verticales se disipan a través de las capas granulares hasta llegar a la Subrasante.

Las mezclas asfálticas, como ya hemos visto anteriormente, sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculada a factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

El comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica se refiere a aquellas propiedades que se manifiestan cuando aplicamos una carga (carga de servicio) y nos define la calidad, resistencia y durabilidad de una mezcla asfáltica.

Su comportamiento depende de varios factores como son los materiales que la componen, la sollicitación de carga de tránsito aplicada, el tiempo donde esta actúa y la temperatura del ambiente en que se encuentra. En el comportamiento mecánico se evalúa la estabilidad, fluencia densidad y porcentaje de vacíos.

#### **Comportamiento dinámico:**

Las mezclas asfálticas tienen un comportamiento dinámico debido a la condición elástica del material. El comportamiento visco elástico es el principal motivo para la deformación de las mezclas asfálticas considerando una condición dinámica.

La condición dinámica toma en cuenta la frecuencia que simule las cargas de diseño de tráfico y genere una deformación que no supere las condiciones de fisura o rotura de la mezcla.

La caracterización mecánica y dinámica de mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de pavimentos es compleja debido a la diversidad de los materiales y tamaños que la conforman, la afectación de las condiciones medioambientales y las cargas que reciben; es por esto que se necesitan múltiples ensayos de laboratorio para poder establecer los parámetros de diseño, construcción y mantenimiento de las vías.

Se pueden encontrar un gran número de ensayos de laboratorio que tratan de evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas. Los trabajos iniciales consideran los ensayos de estabilidad y flujo Marshall, resistencia a la tracción Indirecta, módulo resiliente, entre otros.

### **2.4.1. Factores que influyen en el comportamiento de las mezclas**

Los factores que influyen en el comportamiento de las mezclas asfálticas son: la naturaleza del cemento asfáltico, es decir, la susceptibilidad térmica del asfalto; de la granulometría del tamaño máximo del agregado y el tipo de curva que puede ser continua o discontinua ya que influyen en el porcentaje de vacíos; textura y forma de los agregados que afectan la compacidad por lo que obtiene un módulo de rigidez más bajo.

#### **La naturaleza del cemento asfáltico:**

La susceptibilidad térmica del asfalto es un factor que influye notablemente en el comportamiento de la mezcla.

Las mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos rígidos son menos propicias a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la carga y, en consecuencia, tienen mayor vida a la fatiga.

Los asfaltos blandos hacen que las mezclas asfálticas sean más susceptibles a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la carga y, en consecuencia, más propensas a la deformación permanente.

El contenido de asfalto es el parámetro que más influye en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Para valores de porcentajes de asfalto por debajo del óptimo, la resistencia mecánica y la resistencia a la fatiga aumentan con el incremento del contenido de asfalto.

Para valores de porcentaje de asfalto por encima del óptimo, se presenta una disminución de las características mecánicas de la mezcla, incluso con aumento del riesgo a sufrir deformación permanente.

#### **Granulometría:**

Tomando en cuenta la granulometría, aunque la influencia del tamaño máximo del agregado no sea tan notable como el contenido de asfalto, la curva granulométrica puede influir a través de dos factores: el tamaño máximo del agregado y el tipo de curva, que puede ser continua o discontinua.

Estos dos factores tienen influencia en el porcentaje de vacíos y, por ende, sobre la resistencia a la fatiga y la deformación permanente.

### **Textura y forma de los agregados:**

La textura y forma del agregado son factores que también afectan la compactación. Los agregados angulosos con superficies rugosas, son frecuentemente más difíciles de compactar, lo que lleva a un menor volumen de vacíos para una misma energía de compactación, en consecuencia, un módulo de rigidez más bajo.

Para una misma energía de compactación y una misma granulometría, las mezclas asfálticas constituidas por agregados redondos y lisos presentan mayor porcentaje de vacíos y son fáciles de compactar, mientras que las mezclas con agregados triturados resultan con menor porcentaje de vacíos.

Para una misma compactación, parece no haber diferencias significativas en la duración de la vida a la fatiga entre mezclas con agregados redondeados y lisos, y mezclas con agregados triturados.

La incorporación de finos en las curvas granulométricas reduce el porcentaje de vacíos, con lo que el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica aumenta.

El porcentaje de vacíos del agregado mineral varía en función de la curva granulométrica para una curva, más cercana a la línea de potencia 0,45 (curva de máxima densidad llamada de filler), el porcentaje de vacíos es más bajo y la compactación más fuerte. **(XIX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, 2013)**

### **2.5. Evaluación de las mezclas asfálticas por imágenes digitales**

Las mezclas asfálticas están constituidas por materiales granulares: agregados finos y gruesos, asfaltos, aditivos y vacíos. Cada uno de estos componentes contribuye a conformar la estructura interna de las mezclas asfálticas compactadas, la cual permite que las mezclas exhiban características de resistencia a fatiga, ahullamiento, desgaste, envejecimiento y también capacidad de drenaje, entre otros.

Recientemente los desarrollos de equipos y software para la captura, procesamiento y análisis de imagen, abre la posibilidad de investigar el comportamiento de mezclas asfálticas a partir de la evaluación de imágenes tomadas por escáneres, cámaras digitales

y otros sistemas; resultados que apoyan y corroboran los realizados en laboratorio de una forma más rápida y sencilla.

El procesamiento digital de imágenes es un campo de la ingeniería que se ha venido desarrollando actualmente buscando realizar una inspección y obtención de información de una forma más precisa y rápida, tiene un campo de aplicación amplio y diverso en donde por una parte se puede usar para examinar la granulometría de la mezcla relacionando su distribución a propiedades mecánicas y de comportamiento

La tomografía computarizada con rayos “x”, permite caracterizar la estructura interna de mezclas asfálticas con el fin de analizar y modelar su desempeño. En particular, esta técnica ha permitido estudiar el contenido, tamaño, distribución y conectividad de los vacíos y la relación de estas variables con la susceptibilidad al deterioro por la presencia de humedad, la capilaridad y la permeabilidad de las mezclas, técnica que proporciona importantes ventajas con respecto a los ensayos estándar ya que las mediciones son objetivas, de rápida ejecución, repetibles y reproducibles.

Es una metodología relativamente nueva en nuestro ámbito que realiza un reconocimiento de características de las mezclas tratando de evaluar las metodologías de diseño que empleamos en nuestro medio, ya que este permitirá tener una mayor confiabilidad en los parámetros considerados para el diseño y evaluación de las mezclas asfálticas.

Las técnicas de captura y procesamiento de imágenes constituyen un ejemplo de tecnología innovadora para la caracterización de materiales utilizados en la construcción de pavimentos, especialmente agregados y mezclas asfálticas.

### **2.5.1. Ventajas de la tomografía computarizada**

La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en prueba de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas o químicas.

La tomografía computarizada es una técnica que permite el análisis no destructivo de piezas de hormigón en todo su volumen.

La aplicación de esta técnica es de gran interés para diferentes tipos de estudios no solo en el campo de aplicación industrial sino también en investigación y permite obtener

información más detallada, de forma menos costosa o a veces imposible de obtener por otros medios.

Se puede utilizar un conjunto de imágenes de (TC) para caracterizar el volumen de la pieza geometría, porosidad, fases materiales, grietas.

### **2.5.2. Imágenes generadas con tomografía computarizada (TC)**

La tomografía computarizada (TC) es una técnica que genera imágenes de secciones transversales de una pieza. Esta técnica difiere de la radiografía en que el haz de energía y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que va a obtener la imagen.

El equipo a utilizar para este procesamiento se trata de un tomógrafo espiral o helicoidal multicorte de última generación que posee más detectores ubicados en forma de abanico, formando un sistema tubo-detectores, un arco móvil y una rotación continua alrededor de la mesa del objeto.

Genera imágenes a partir de la señal de atenuación que sufre, el haz está directamente relacionado con la densidad, el espesor atravesado y la composición del material, así como la energía del haz de rayos “x”. La TC utiliza esta información obtenida desde diferentes ángulos para determinar la configuración de la sección transversal con ayuda de un algoritmo de reconstrucción.

Una vez obtenidas las imágenes digitales, estas son importadas al programa de análisis de imágenes para poder evaluarlas para permitir determinar las características y propiedades de las mezclas asfálticas; el porcentaje de vacíos, composición de la granulometría.

### **2.5.3. Instrumentación en tomografía computarizada (TC)**

Los sistemas de TC, ambos, médicos e industriales, están compuestos por una serie de subsistemas típicos. La selección de los componentes de esos subsistemas depende de la aplicación específica para la cual se haya diseñado el sistema; sin embargo, la función que desempeña cada subsistema es común en casi todos los escáneres de TC; esos subsistemas son:

Una interfaz de operador

Una fuente de radiación

Un detector de radiación o un conjunto de detectores

Un ensamble mecánico de escaneo

Un sistema computacional

Un sistema de visualización gráfica

Un medio de almacenamiento de datos

#### **2.5.4. Descripción del equipo**

Los elementos básicos que conforman un equipo de rayos “x” son una fuente y detector.

La geometría de los rayos “x” y del detector varía dependiendo del equipo; para el estudio de mezclas asfálticas típicamente se emplean rayos colimados que cubren en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea. El objeto a escanear se ubica entre la fuente y el detector y se envía una descarga de rayos “x” desde la fuente hacia el objeto, midiendo la intensidad de la radiación que llega al detector.

La densidad del objeto determina la intensidad de los rayos “x” que llega al detector entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada puesto que los rayos “x” son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente.

Cada una de las mediciones antes descritas se denomina vistas. Es común que la fuente y el detector o serie de detectores, sean fijos, y que el objeto se ubique sobre una mesa giratoria. De esta manera, mientras el objeto rota alrededor de su propio eje se adquieren múltiples vistas en todas sus posibilidades orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior de imágenes bidimensionales.

Las imágenes se denominan secciones, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal.

Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, matriz asfáltica y vacía) y su distribución real, así como las diferencias que existen en términos de tamaño y proporción de agregados y vacíos en dos tipos diferentes de mezclas asfálticas.

Caracterización de la estructura de vacíos y del flujo de agua en mezclas asfálticas mediante el análisis de imágenes de rayos “x”.

La densidad del objeto determina la intensidad de los rayos “x” que llegan al detector; entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada, puesto que los rayos “x” son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente. (<https://es.wikipedia.org/wiki/tomografia>)

#### **2.5.5. Descripción del programa software imagenJ**

El ImageJ es una herramienta muy interesante para el procesado de imágenes. Se pueden hacer operaciones muy sencillas sobre imágenes como ajustar el contraste, transformar una imagen color en una imagen blanco y negro. Además, se puede utilizar ImageJ para efectuar operaciones más sofisticadas sobre las imágenes como por ejemplo resaltar algunos detalles y ocultar otros.

Una imagen en blanco y negro, es un arreglo rectangular de puntos (píxeles) a cada uno de los cuales se le asigna un número entre 0 y 255. El valor 0 representa el negro y el valor 255 el blanco. Los números comprendidos entre 0 y 255 representan lo que se conoce como una escala de grises. Así las zonas oscuras de una imagen estarán representadas por píxeles con valores cercanos a 0 mientras que las zonas muy claras con píxeles cercanos a 255. Es decir que, formalmente, una imagen blanco y negro no difiere de una matriz y de hecho es una matriz. Cada elemento de la matriz representa un punto de la imagen y el valor de dicho punto es la intensidad que tiene la imagen en ese punto.

### **CAPÍTULO III**

## **INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EVALUADO POR IMÁGENES DIGITALES**

### **3.1. Elaboración de mezclas asfálticas**

Se realizó 36 especímenes de los cuales 18 se realizaron con agregados de San Blas, Santa Ana y cemento asfáltico convencional PROBISA 85/100 industria chilena los cuales son utilizados para realizar los pavimentos flexibles de las calles urbanas de la ciudad de Tarija.

Los siguientes 18 especímenes son elaborados con agregados del río Canaletas y cemento asfáltico convencional PROBISA 85/100 industria chilena, componentes que utiliza SEDECA para realizar su pavimento flexible.

#### **3.1.1. Caracterización de los agregados pétreos**

##### **a) Toma de muestras (ASTM C75 - AASHTO T2)**

Para el control de agregados minerales el muestreo es una de las funciones más importantes por la cual el procedimiento debe regirse a las normas, buscando que dichas muestras sean lo más representativas.

Para realizar nuestro estudio se hizo el muestreo de acopio de las siguientes plantas chancadoras:

Agregados chancados procedentes del río Canaletas de la planta asfáltica de acopio en la comunidad de Junacas, el cual es utilizado en proyectos realizados por SEDECA.

Figura 3.1: Planta asfáltica y chancadora de Junacas.



Fuente: Elaboración propia

Agregados chancados procedentes de Santa Ana, San Blas donde fueron obtenidos del lugar de acopio ubicado la localidad de La Pintada los cuales son utilizado en proyectos de H.A.M. de la provincia Cercado.

Figura 3.2: Planta asfáltica y de acopio de materiales La Pintada



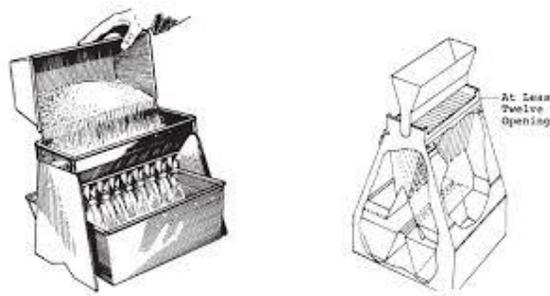
Fuente: Elaboración de propia

**b) Cuarteo de materiales (ASTM C 702 - AASHTO T248)**

Se realiza la homogenización de los agregados de tal forma que este sea representativo al total de la muestra.

Para la caracterización de materiales se usó el cuarteo mecánico; el material obtenido de las plantas de acopio es llevado a laboratorio para realizar los ensayos correspondientes para así determinar las características del mismo.

Figura 3.3: Cuarteador mecánico de materiales.



Fuente: Elaboración propia

**c) Análisis granulométrico (ASTM E40 - AAHTO T27-99)**

Se determinó la distribución por tamaño, de las partículas de los agregados finos y gruesos expresados en porcentajes del peso total a través de una serie de tamices de diferentes aberturas las cuales se hacen progresivamente más pequeñas y se pesa el material retenido en cada tamiz.

Figura 3.4: Juego de tamices para el análisis



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Muestra pasada por el juego de tamices



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1: Planilla de resultados de la granulometría H.A.M. - La Pintada

Peso de la muestra	3000 gr.		3000 gr.		3000 gr.	
Tamiz	Grava		Gravilla		Arena triturada	
N°	Peso retenido	% que pasa	Peso retenido	% que pasa	Peso retenido	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4"	56,00	98,13	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2"	2483,90	15,34	572,00	80,93	0,00	100,00
3/8"	432,40	0,92	597,50	61,02	0,00	100,00
N°4	26,20	0,05	1779,70	1,69	39,00	98,70
N°8	0,00	0,05	50,20	0,02	231,60	90,98
N°16	0,00	0,05	0,00	0,02	185,90	84,78
N°30	0,00	0,05	0,00	0,02	318,40	74,17
N°50	0,00	0,05	0,00	0,02	1116,80	36,94
N°100	0,00	0,05	0,00	0,02	918,30	6,33
N°200	0,30	0,04	0,20	0,01	145,50	1,48
Base	1,20	0,00	0,40	0,00	44,50	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2: Planilla de resultados de la granulometría SEDECA - Junacas

Peso de la muestra	3000 gr.		3000 gr.		3000 gr.		3000 gr.	
Tamiz	Grava		Gravilla		Arena triturada		Filler	
N°	Peso retenido	% que pasa	Peso retenido	% que pasa	Peso retenido	% que pasa	Peso retenido	% que pasa
1"	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/4"	68,30	97,72	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
1/2"	1277,10	55,15	4,30	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
3/8"	813,60	28,03	42,40	0,00	0,00	100,00	0,00	100,00
N°4	735,40	3,52	2306,90	21,00	21,00	99,30	14,20	99,53
N°8	100,30	0,18	635,80	610,90	610,90	78,94	452,20	84,45
N°16	2,90	0,08	5,40	494,60	494,60	62,45	748,80	59,49
N°30	0,10	0,08	0,20	365,50	365,50	50,27	294,40	49,68
N°50	0,10	0,07	0,40	523,50	523,50	32,82	445,60	34,83
N°100	0,20	0,07	0,80	651,50	651,50	11,10	489,80	18,50
N°200	0,40	0,05	1,10	208,40	208,40	4,15	280,80	9,14
Base	1,60	0,00	2,70	124,60	124,60	0,00	274,20	0,00

Fuente: Elaboración propia

**d) Peso específico de los agregados (ASTM E 127-AASHTO T 85-91 y ASTM E128-AASHTO T 84-00)**

Se realizó este ensayo para determinar el peso específico corriente (bruto), el peso específico saturado, peso específico aparente y porcentaje de absorción de los agregados, después de 24 horas en agua a temperatura ambiente.

Figura 3.6: Peso específico del agregado grueso



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7: Peso específico del agregado fino



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3: Resultados peso específico H.A.M. - La Pintada

<b>Peso específico</b>	<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>
Peso específico a granel( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,530	2,510	2,470
Peso específico saturado sin humedad superficial ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,560	2,550	2,540
Peso específico aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,630	2,630	2,670
Porcentaje de absorción (%)	1,420	1,830	3,090

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4: Resultados de peso específico SEDECA - Junacas

<b>Peso específico</b>	<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>	<b>Filler</b>
Peso específico a granel( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,630	2,560	2,340	2,390
Peso específico saturado sin humedad superficial ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,670	2,620	2,450	2,490
Peso específico aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2,750	2,730	2,620	2,650
Porcentaje de absorción (%)	1,670	2,520	3,790	3,930

Fuente: Elaboración propia

**e) Peso unitario de los agregados (ASTM C29)**

El objetivo de este ensayo es determinar la relación entre el peso de un material y el volumen ocupado por el mismo expresado en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; para el ensayo se utilizará molde cilíndrico el cual deberá ser calibrado para obtener su volumen donde es llenado y pesado para determinar el peso suelto.

Para el peso compactado se llenó el recipiente en tres partes, cada una es apisonada con una varilla metálica con 25 golpes después enrazar el molde es pesado.

Figura 3.8: Peso compactado y suelto



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9: Material enrazado y pesado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5: Resultados de peso unitario H.A.M. - La Pintada

<b>Peso unitario</b>	<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>
Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1,344	1,355	1,357
Compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1,526	1,476	1,478

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6: Peso unitario SEDECA - Canaletas

<b>Peso unitario</b>	<b>Grava</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>	<b>Filler</b>
Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1,439	1,392	1,610	1,508
Compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1,483	1,516	1,728	1,758

Fuente: Elaboración propia

**f) Ensayo de abrasión (ASTM 131-AASHTO T96-99)**

Se realizó este ensayo con el fin de determinar la resistencia a la abrasión de los agregados gruesos triturados y no triturados por medio del desgaste por carga abrasiva en la máquina de los Ángeles.

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir depende de la granulometría del agregado grueso.

Tabla 3.7: Requerimiento según el tamaño de material que se tenga

Gradación		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de material a emplear (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	N°4			2500±10	
N°4	N°8				5000±10
Peso total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de esferas		12	11	8	6
N° de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación		15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia

El tambor de la máquina se cargó con 11 esferas para la grava con gradación B y para la gravilla se utilizó la gradación C con 8 esferas; ambas muestras con 500 revoluciones con un tiempo de rotación de 15 minutos.

Se hizo girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto; una vez descargado el material se lo tamizó el material por el tamiz N °12 para después ser pesado; se calcula la diferencia entre el peso original y el peso final de la muestra expresado como un porcentaje, es decir, el porcentaje de desgaste.

Figura 3.10: Máquina de desgaste de los Ángeles.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11: Tamizado de la muestra después de salir del horno.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: Porcentaje de desgaste SEDECA - Junacas.

Gradación	Grava	Gravilla
	B	C
N° de esferas	11	8
N° de revoluciones	500	500
% de DESGASTE $\leq 35$	24,200	29,600

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Porcentaje de desgaste H.A.M. - La Pintada

Gradación	Grava	Gravilla
	B	C
N° de esferas	11	8
N° de revoluciones	500	500
% de DESGASTE $\leq 35$	25,000	27,500

Fuente: Elaboración propia

**g) Equivalente de arena (ASTM D2419 AAHTO T176-00)**

Este ensayo se realizó para determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso en los agregados finos; el material a ser utilizado es el que pasa la malla N°4.

Es decir, el equivalente de arena es el porcentaje de arena; con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas. (Manual de Ensayos de suelos y Materiales / Asfaltos.Bolivia)

Figura 3.12: Preparación del floculante y de la muestra.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13: Determinación del % de arcilla y arena que posee la muestra.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10: Resultados de equivalente de arena para las muestras analizadas.

Ensayo	H.A.M - La Pintada	SEDECA - Junacas
Equivalente de arena (%) > 50	82,500	71,670

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Control de calidad del cemento asfáltico

#### 3.1.2.1. Muestreo de cemento asfáltico

Para la elaboración del proyecto el muestreo del cemento asfáltico, se aplica en dos diferentes plantas que utilizan el cemento asfáltico convencional PROBISA CA-85/100 industria chilena la planta la pintada H.A.M y la planta de Junacas SEDECA.

Figura 3.13: Muestreo planta asfáltica La Pintada - HAM.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14: Muestreo planta asfáltica en Junacas -SEDECA



Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2.2. Ensayo de penetración (ASTM D5 - AASHTO T49 - 97)

Teniendo en cuenta la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único componente es un asfalto, podemos determinar situaciones que atentan contra su estructura; la penetración que tienen los materiales asfálticos se usa como una medida de consistencia.

La penetración es la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga con

un peso de 100 gramos a una temperatura de 25°C durante 5 segundos; la unidad de penetración es (1/10mm).

Figura 3.15: Penetración del asfalto.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11: Penetración de las muestras analizadas

<b>Penetración a 25 °C AASHTO T49-97 - ASTM D5 (mm)</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Resultados</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
H.A.M	92	85	100
SEDECA	91	85	100

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.3. Peso específico (ASTM D71 - AASHTO T229 - 97)

Se realiza este ensayo para conocer el peso específico del producto asfáltico, el cual es un dato útil para realizar las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Además, se emplea también como un factor para determinar huecos en mezclas asfálticas para pavimentaciones compactadas. Es un dato necesario para el diseño Marshall.

Figura 3.16: Peso específico del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12: Peso específico de las muestras analizadas

<b>Peso específico (ASTM D71 - AASHTO T229-97)</b> <b>(gr/cm<sup>3</sup>)</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Resultados</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
H.A.M	1,050	1	1,050
SEDECA	1,047	1	1,050

Fuente: Elaboración propia

#### 3.1.2.4. Ensayo de ductilidad (ASTM D113 - AASHTO T51 - 00)

Se realiza este ensayo para medir la distancia en centímetros , en la cual una probeta de cemento asfáltico es alargada antes de romperse; es decir, la ductilidad es la capacidad que tiene el material de admitir grandes deformaciones sin perder su resistencia.

Figura 3.17: Preparación de los moldes para ductilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.18: Deformación del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13: Ductilidad en muestras estudiadas.

<b>Ductilidad (AASHTO T51 - ASTM D113) (cm)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificaciones</b>
H.A.M	105	$\geq 100$
SEDECA	110	$\geq 100$

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.5. Ensayo de punto de inflamación del cemento asfáltico mediante la copa de Cleveland (ASTM D1310-01-AASHTO T79-96).

El punto de inflamación es la temperatura a la cual puede ser calentado con seguridad el asfalto sin que se produzca la inflamación instantánea de los vapores liberados, en presencia de una llama libre.

Se efectúa en un equipo normalizado denominado copa de Cleveland.

Figura 3.19: Punto de inflamación.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14: Punto de inflamación de las muestras analizadas

<b>Punto de inflamación (AASHTO T79-96) (ASTM D1310 -01) (°C)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Resultados</b>	<b>Mínimo</b>
H.A.M	287	232
SEDECA	288	232

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2.6. Pérdida de masa ( ASTM D175-AASHTO T240-06).

Para ejecutar esta prueba se somete 500 g. de cemento asfáltico a un calentamiento de cinco horas a una temperatura de 160°C . Al finalizar el periodo de calentamiento se saca la cápsula del horno y una vez, enfriada se pesa nuevamente para calcular las pérdidas debidas a la volatilización, que se reportaran como porcentaje del peso original de la muestra .

Figura 3.20: Proceso de pérdida de masa.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15: Pérdida de masa de las muestras analizadas

<b>Pérdida de masa (ASTM D175-AASHTO T240-06) (%)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificaciones</b>
H.A.M	0.054	$\leq 1$
SEDECA	0.129	$\leq 1$

Fuente:Elaboracion propia

### 3.1.2.7. Punto de reblandecimiento (ASTM D36 AASHTO T179-05 )

Este ensayo se realizó para determinar la temperatura en la cual hay un cambio gradual en la consistencia del cemento asfáltico debido al incremento de temperatura, utilizando el equipo anillo y bola .

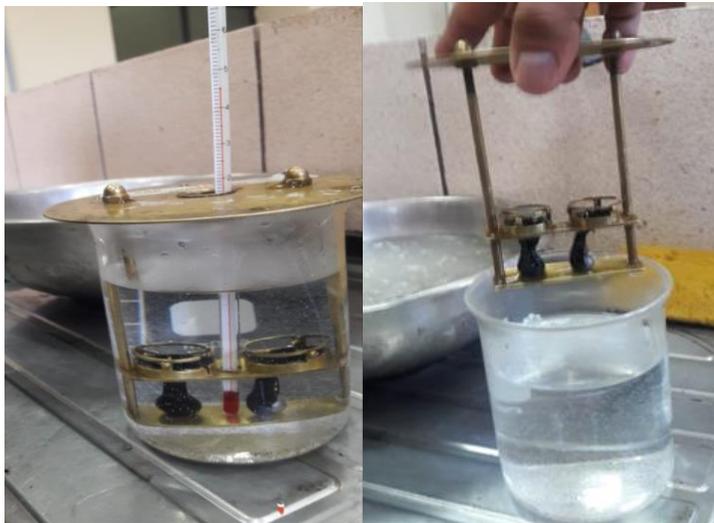
Es decir el punto de reblandecimiento es determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez.

Figura 3.21: Procedimiento de punto de reblandecimiento.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22: El cemento asfáltico a la temperatura de fluidez.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16: Punto de reblandecimiento muestras analizadas

<b>Punto de reblandecimiento (AASHTO T179-05 ASTM D36) (°C)</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificaciones</b>	
		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
H.A.M	47	42	53
SEDECA	48	42	53

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3. Diseño de especímenes método Marshall

El criterio para conseguir una mezcla satisfactoria está basado en requisitos mínimos de estabilidad, fluencia, densidad y porcentaje de vacíos.

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de mezclas asfálticas preparadas en caliente; utilizando el equipo Marshall, determina características físicas de las mezclas y analiza los parámetros que definen el contenido de asfalto.

Este método está limitado al proyecto y control de mezclas asfálticas elaboradas en planta estacionaria, en caliente empleando cemento asfáltico. Con la prueba de Marshall se determina valores de estabilidad y de flujo con especímenes cilíndricos.

#### 3.1.3.1. Descripción del método

Con la prueba de Marshall se determina valores de estabilidad y de flujo con especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado y aprobados sesenta grados centígrados; el valor de estabilidad se determina midiendo la carga necesaria para producir la falla del espécimen, aplicada en sentido normal a su eje. La deformación vertical producida en el espécimen por dicha carga será el vapor del flujo.

El valor de estabilidad expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada, y está afectado principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo de agregado. Principalmente el valor de estabilidad es un índice de la calidad del

agregado. El valor de flujo representa la deformación requerida, en el sentido del diámetro del espécimen, para producir la fractura.

Este valor es una indicación de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica y, consecuentemente, de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica a deformarse bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos. El equipo necesario para la elaboración y prueba de los especímenes es el que sigue:

Un molde de compactación provisto de un collarín y de una placa de base, un sostén del molde de compactación para sujetar firmemente el molde, un pisón de compactación con superficie circular de apisonado de nueve puntos ochenta y cuatro centímetros ( $9,84 \text{ cm} = 1 \frac{7}{8}''$ ) de diámetro, equipado con una pesa deslizante de cuatro puntos quinientos treinta y seis kilogramos ( $4,536 \text{ kg} = 10 \text{ lb}$ ) cuya altura de caída es de cuarenta y cinco punto siete centímetros ( $45,7 \text{ cm} = 18''$ )

Una máquina de compresión Marshall accionada con motor eléctrico que permite aplicar cargas por medio de una cabeza de prueba con forma de anillo seccionado a una velocidad de cinco puntos cero ocho centímetros sobre minuto ( $5,08 \text{ cm/min} = 2 \text{ min}$ )

Está equipada con un anillo calibrado para determinar el valor de las cargas y un extensómetro para medir las deformaciones del anillo.

### **3.1.3.2. Elaboración de los especímenes**

Una vez escogido el contenido óptimo de asfalto para el diseño tomando promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4% de cemento asfáltico.

Fijada la granulometría de la mezcla asfáltica se determina el porcentaje en peso del material pétreo. Para cada contenido de cemento asfáltico se fabricarán tres especímenes cada uno de los cuales requieren mil doscientos gramos (1200 gr.) de agregado pétreo. Se toma de cada uno de los tamaños mencionados la cantidad de muestra que resulta de multiplicar el porcentaje en peso de cada fracción por el peso total de la muestra. Las fracciones ya pesadas se mezclarán previamente a la adición del cemento asfáltico.

La cantidad de cemento asfáltico que deberá agregarse a cada muestra se calculara sobre la base de contenido mínimo de cemento asfáltico que se determina como ya ha indicado

con anterioridad. Las cantidades de cemento asfáltico deberán corresponder a los siguientes porcentajes de cemento asfáltico.

Contenido calculado -1 %

Contenido calculado neto

Contenido calculado +0,5 %

Contenido calculado +1 %

Contenido calculado +1,5 %

Contenido calculado +2 %

Se mezclarán los agregados y el cemento asfáltico, calentados previamente a las temperaturas de ciento setenta y cinco grados centígrados y ciento veinte grados centígrados respectivamente, hasta obtener una distribución uniforme del cemento asfáltico. La temperatura de la mezcla no deberá ser menor de 100°C al momento de elaborar el espécimen. En ningún caso deberá ser recalentada.

Para compactar los especímenes de la mezcla asfáltica se procederá a calentar en el horno a 100°C el pisón de compactación y el molde. Una vez caliente se sacará el equipo del horno y se colocará un papel filtro en el fondo del molde y se llenará este con la mezcla caliente.

Se apoyará el pisón sobre la mezcla y se aplicarán setenta y cinco golpes (75) con la pesa deslizante. La cara del pisón será mantenida paralela a la base del molde durante el proceso de compactación. Se quitará el collarín y se invertirá la posición del molde; se colocará el collarín y se aplicarán otros setenta y cinco golpes (75) haciendo un total de 150 golpes. Los 75 golpes se aplican a mezclas proyectadas para recibir presiones de contacto comprendidas entre siete y catorce kilogramos por centímetro cuadrado (7 a 14 kg/cm<sup>2</sup>=100 a 200 lb/pulg<sup>2</sup>).

Figura 3.23: Preparación de los agregados para mezcla.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.24: Preparación de la mezcla a 150°C



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25: Compactación de los especímenes



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.26: Desmoldar los especímenes



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27: Prueba para estimación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia

### **Determinación de alturas de los especímenes:**

Los especímenes compactados deberán tener una altura de seis puntos treinta y cinco centímetros ( $6.35 \text{ cm} = 2\text{-}1/2''$ ), con una tolerancia de tres puntos dos milímetros ( $3.2 \text{ mm} = 1/8''$ ) y en caso contrario deberá repetirse el proceso.

Uno de los factores necesarios para obtener los valores óptimos de diseño de una mezcla asfáltica es la determinación de alturas de los moldes cilíndricos ya compactados.

Figura 3.28: Medición de alturas con ayuda de Vernier.



Fuente: Elaboración propia.

### **Pesos específicos en los especímenes:**

La determinación del peso específico de la mezcla asfáltica compactada en laboratorio es de importancia en el diseño de la mezcla asfáltica para que cumpla con los parámetros de diseño; para lo cual se tiene los siguientes pasos:

Se obtiene el peso al aire o peso seco de la briqueta asfáltica.

Se sumerge la briqueta en agua a 25 °C por tiempo de 5 minutos para luego ser secada y pesarla para determinar el peso saturado con superficie seca.

Se sumerge la briqueta a la canastilla para obtener el peso de la muestra sumergida.

Figura 3.29: Peso seco del espécimen.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.30: Especímenes sumergidos en agua a 25°C.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.31: Peso sumergido de los especímenes.



Fuente: Elaboración propia.

### **Prueba de compresión de los especímenes:**

La prueba de los especímenes comprende la determinación del peso volumétrico y la determinación de estabilidad y flujo de los mismos. La determinación del peso volumétrico del espécimen ya compactado se hará dividiendo el peso entre el volumen. Los valores de estabilidad y flujo se determinarán ensayando los especímenes en el aparato Marshall, siguiendo el procedimiento siguiente:

Se sumerge el espécimen en el tanque con agua a la temperatura de sesenta grados centígrados ( $60^{\circ}\text{C}$ ) con medio grado de tolerancia y se mantendrá ahí veinte a treinta minutos; terminando el periodo de inmersión en agua caliente se sacará el espécimen y se secará su superficie.

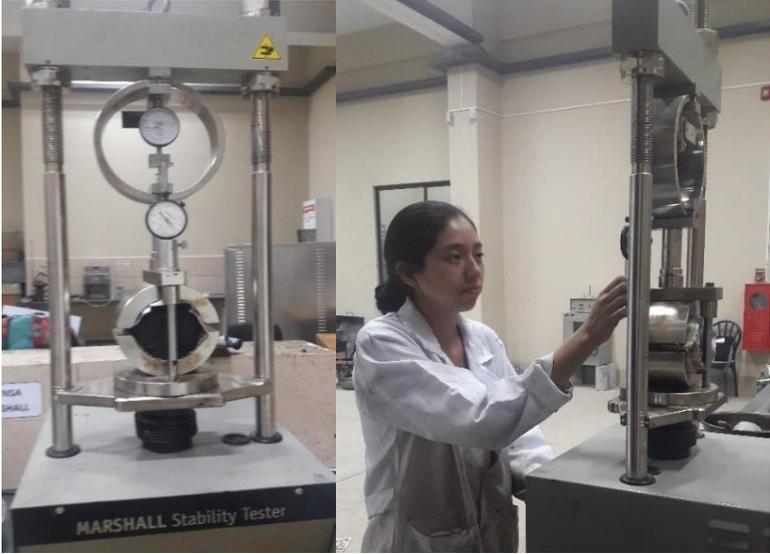
Se colocará el espécimen entre las dos secciones de la cabeza de prueba y se centrará el conjunto en la máquina de compresión.

Se colocará el medidor de flujo en el poste de guía y se ajustará a cero su carátula. Se aplicará la carga al espécimen a una velocidad constante de cinco centímetros sobre minuto hasta que la falla ocurra.

La carga máxima aplicada para producir la falla del espécimen a la temperatura de ( $60^{\circ}\text{C}$ ) se debe registrar como el valor de la estabilidad Marshall.

Mientras la prueba se lleve a cabo se debe sostener firmemente el medidor de flujo sobre el poste guía y se removerá tan pronto se haya aplicado la carga máxima, anotándose la deformación sufrida por el espécimen.

Figura 3.32: Prensa Marshall para prueba de compresión.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33: Especímenes sometidos a prueba de compresión.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34: Especímenes después de ruptura.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17: Resultados de diseño Marshall H.A.M.

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
<b>Determinación del porcentaje óptimo del cemento asfáltico</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	4830,746	5,57
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,351	5,59
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	5,48
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio</b>	<b>5,54</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18: Resultados de diseño Marshall SEDECA

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
<b>Determinación del porcentaje óptimo del cemento asfáltico</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	3738,310	5,20
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,356	5,59
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	6,00
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio</b>	<b>5,60</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Extracción de núcleos

La extracción de núcleos para realizar el análisis de la mezcla asfáltica se realizó de las calles urbanas de la ciudad de Tarija las cuales son Triple Vía, Campero, Delio Echazú, Felipe Palazón, Bolívar, O'connor, mezclas asfálticas realizadas por la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija y de tramos carreteros que son Tarija -Puerta el Chaco; Puerta Chaco-Puente Jarcas; Puente Jarcas-Piedra Larga, Piedra Larga - Canaletas los cuales son elaborados por SEDECA.

La extracción se realizó a los tres bolillos, es decir tres núcleos por tramo teniendo un total de 30 muestras; el equipo extractor a utilizar es otorgado por la universidad.

Las muestras extraídas serán analizadas a través de las imágenes digitales realizando dos cortes transversales al núcleo obteniendo dos imágenes de cada núcleo teniendo un total de 60 imágenes.

Figura 3.35: Extracción de núcleos en calles urbanas.



Fuente:Elaboracion propia

Figura 3.36: Relleno del lugar de extracción.



Fuente:Elaboracion propia

Figura 3.37: Extracción de núcleos tramos de SEDECA.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.38: Relleno de la extracción de los tramos de SEDECA.



Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Descripción de la obtención de imágenes digitales

Los núcleos extraídos de las calles urbanas de la ciudad de Tarija y de tramos carreteros realizados por ambas instituciones mencionadas fueron sometidos al equipo tomográfico basado en la aplicación de rayos “x” a la masa asfáltica a partir de la cual se extraen imágenes bidimensionales monocromáticas, es decir, imágenes pixeladas en escala de grises.

El tomógrafo por defecto nos proporciona imágenes en programa RadiAnd formato DICOM 3.0 (Efilm Lite); para realizar el análisis de estas imágenes se procederá a la importación de las imágenes al software de análisis de imágenes denominado ImageJ basado en programación JAVA; este la transforma de una imagen codificada en una imagen RGB; según la composición de sus pixeles, el programa caracteriza cada pixel por la densidad del componente observado.

En programa nos permite obtener el área de muestra analizada en pixeles, la resolución de la imagen monocromática que nos proporciona el tomógrafo tiene una resolución de 512 x 512 pixeles por lo que el área de un pixel es de 0.1253 mm<sup>2</sup>.

Figura 3.39: Equipo tomográfico.



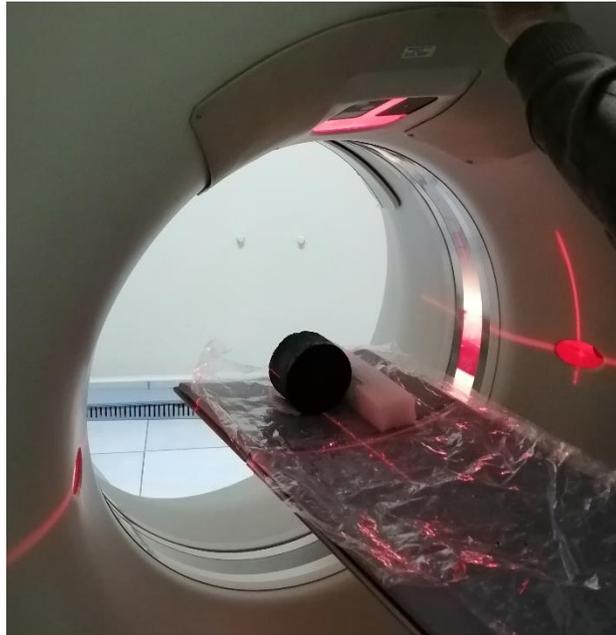
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.40: Núcleo sometido a rayos “x”



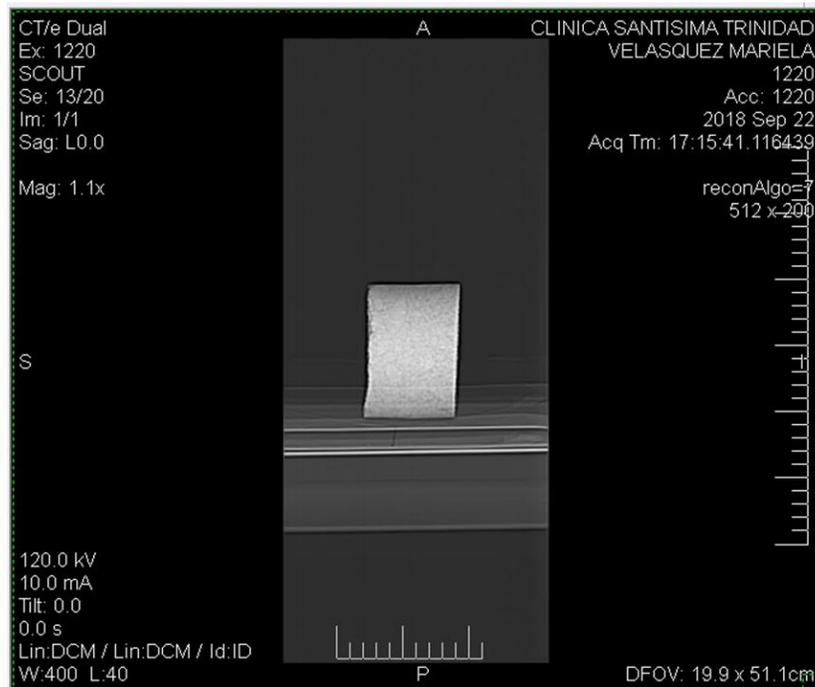
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.41: Espécimen sometido a rayos “x”



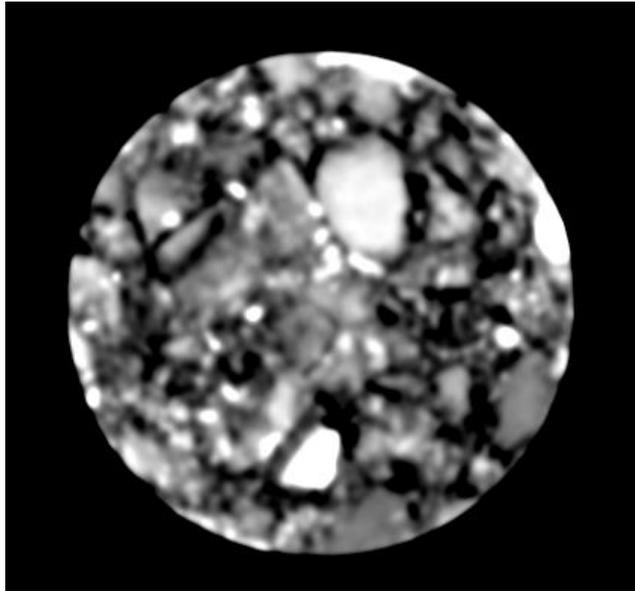
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42: Imagen por el Efilm Lite.



Fuente: Elaboración propia

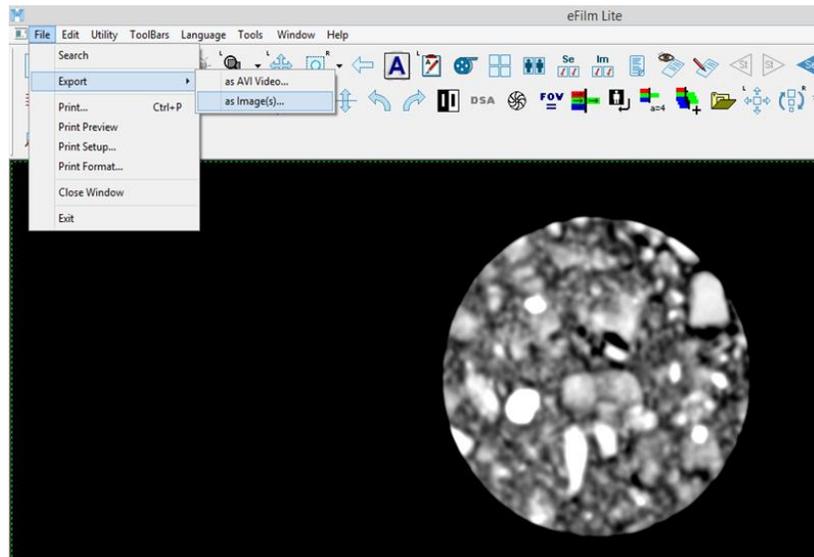
Figura 3.43: Imagen monocromática.



Fuente: Elaboración propia

Imagen obtenida por el tomógrafo que por defecto utiliza el programa eFilm Lite con una imagen monocromática a escala de grises; la resolución de la imagen es de 512 x 512 píxeles como apreciamos en la figura 3.42 y figura 3.43.

Figura 3.44: Importación de imagen monocromática a ImageJ.

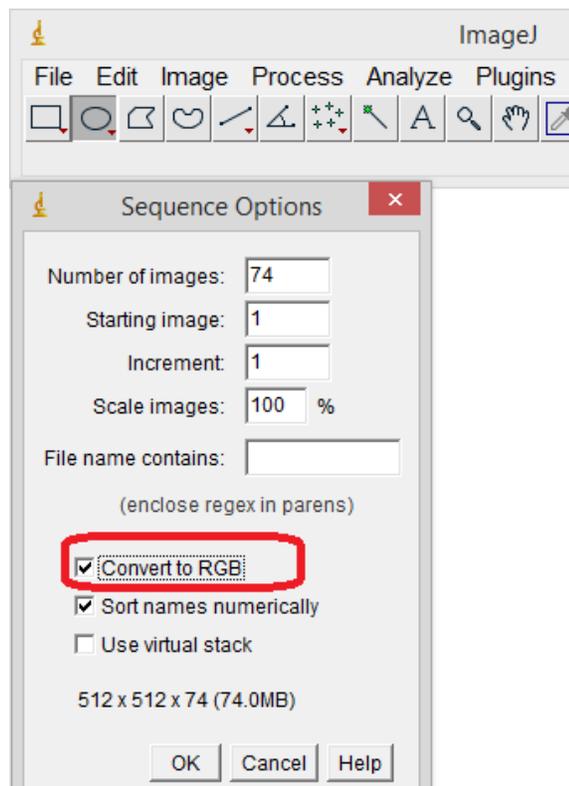


Fuente: Elaboración propia

Importamos la imagen del eFilm Lite imagen monocromática al programa ImageJ convirtiendo en una imagen RGB es decir una imagen de tres colores red (“rojo”), green (“verde”) y blue (“azul”), es modelo cromático que consiste en representar distintos colores a partir de la mezcla de estos tres colores primarios.

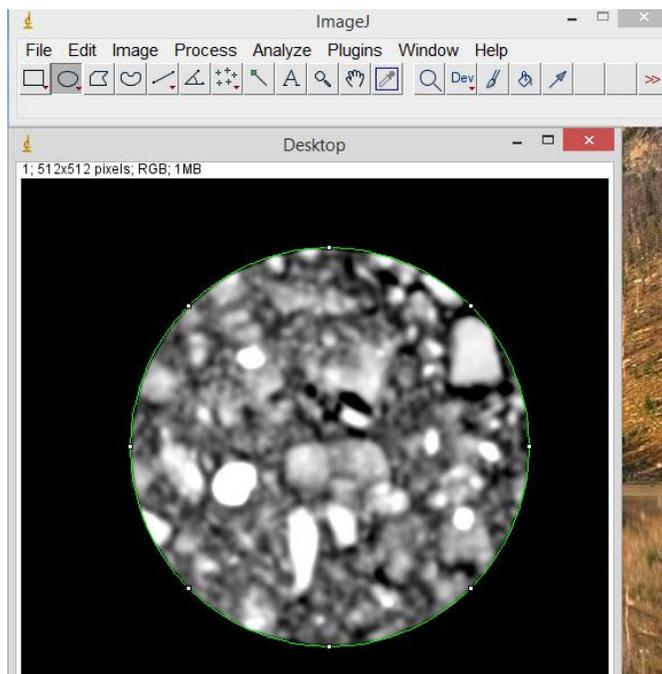
El programa IMAGE J es un programa de procesamiento de imágenes donde cada imagen se puede analizar como una imagen RGB (rojo, verde, azul) o como una imagen binaria (color blanco y negro); por lo tanto podemos escoger la forma que se quiera realizar el análisis o de la forma que podamos distinguir mejor los agregados y los vacíos de la mezcla asfáltica.

Figura 3.45: Convertir en imagen RGB con el ImageJ.



Fuente:Elboracion propia

Figura 3.46: Imagen RGB en programa ImageJ.



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1. Análisis de los vacíos a través de las imágenes.

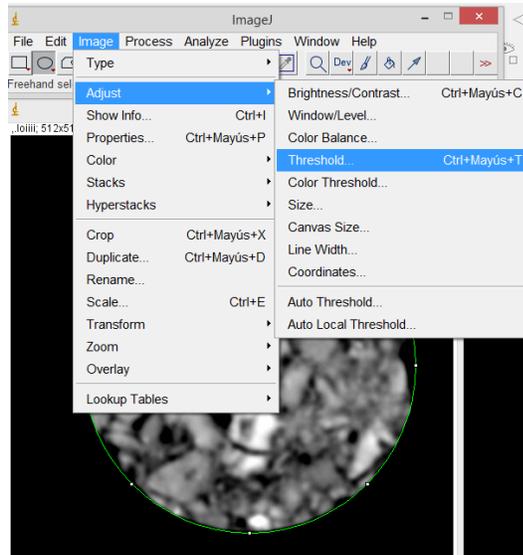
Para realizar este análisis se procedió a importar las imágenes computarizadas RadiAnd DICOM obtenida por el equipo tomográfico al software ImageJ la cual este programa analiza como imagen binaria, es decir una imagen que mantendrá solo dos códigos en su matriz de colores de píxeles, el valor 0 identificado por el color negro y 255 identificado por el color blanco, es decir se hace una transformación de una imagen monocromática imagen en escala de grises a una imagen binaria imagen en blanco y negro.

El programa debido a que el aire es el elemento más liviano dentro de todos los componentes de la mezcla procede a darle al píxel, que es ocupado por aire, un código con el valor de 0 es decir color negro para los vacíos y para los agregados el valor de 255 con el color blanco.

El programa nos brinda una imagen que muestra la distribución de los vacíos de la mezcla donde nos mide el área en % que serían los vacíos que se presentan en la mezcla asfáltica, es decir separando los agregados de los vacíos.

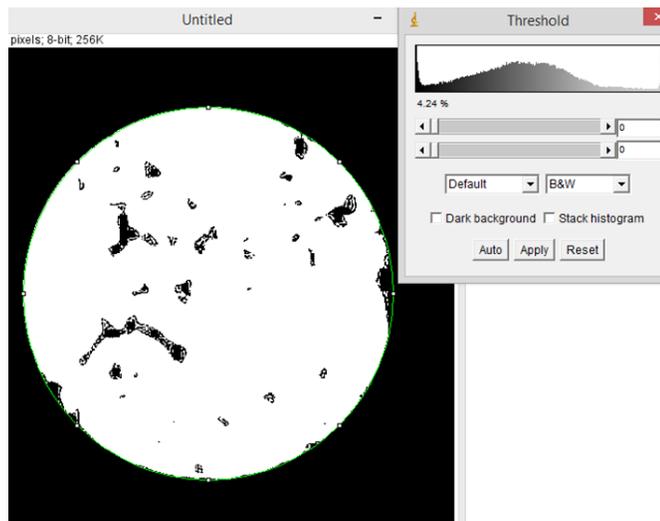
La resolución de la imagen es de 512 x 512 píxeles; además, el programa nos brinda el área y perímetro de la briqueta en píxeles.

Figura 3.47: Ajustes en la imagen RGB.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.48: Imagen con el porcentaje de vacíos.



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2. Análisis de contacto agregado - agregado

El análisis de esta variable es por conteo visual de los puntos de contacto agregado-agregado presente en cada imagen.

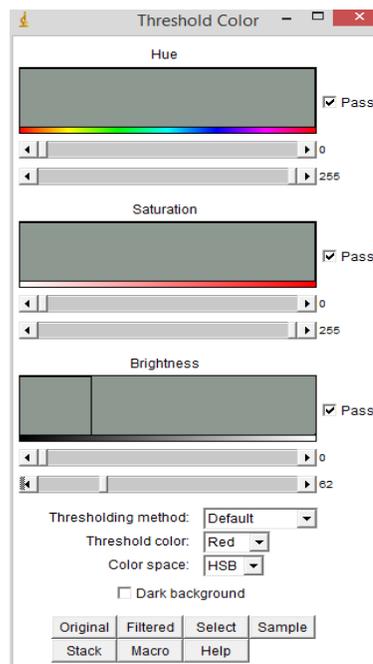
Se realiza la imagen en RGB con pigmentación de color rojo a las partículas que contienen el agregado grueso, es decir, identifican al material cuyas partículas son retenidas en la malla N° 4 (4,75 mm) por lo que se identificó el valor de pixel que delimitara los agregados gruesos de los finos.

Por lo cual el valor límite de separación de agregados es de 62, es decir, todas las partículas de colores con código menor a este serán pigmentadas de color rojo, lo cual facilita el conteo de puntos de contacto ya que resaltará los agregados gruesos.

El valor de 62 es recomendado por el autor del método que nos permite validar el dato obtenido, ya que este es un valor medio de los valores analizados en cada imagen.

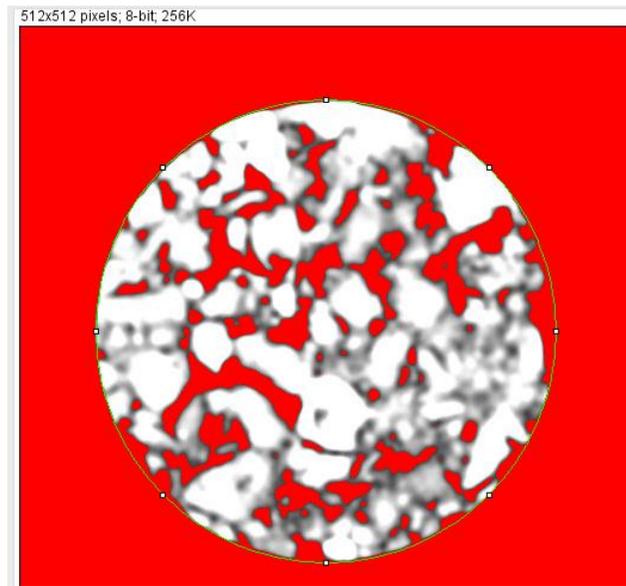
Una vez aplicado el pigmento rojo se procede al conteo de puntos de contacto en el esqueleto formado por los agregados gruesos.

Figura 3.49: Valor límite de la imagen.



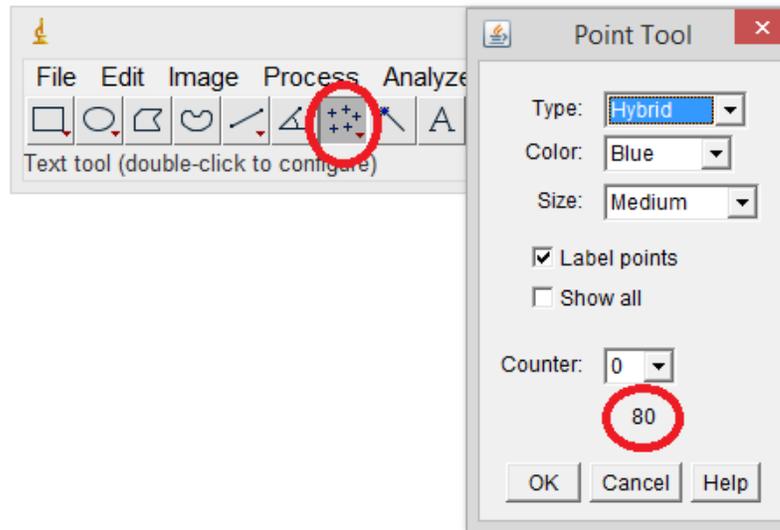
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.50: Imagen con la pigmentación roja.



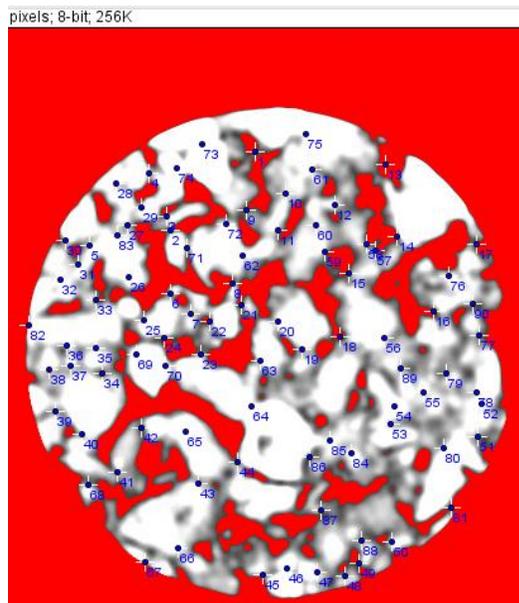
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.51: Puntos para realizar el conteo de contacto.



Fuente: Elaboración propia

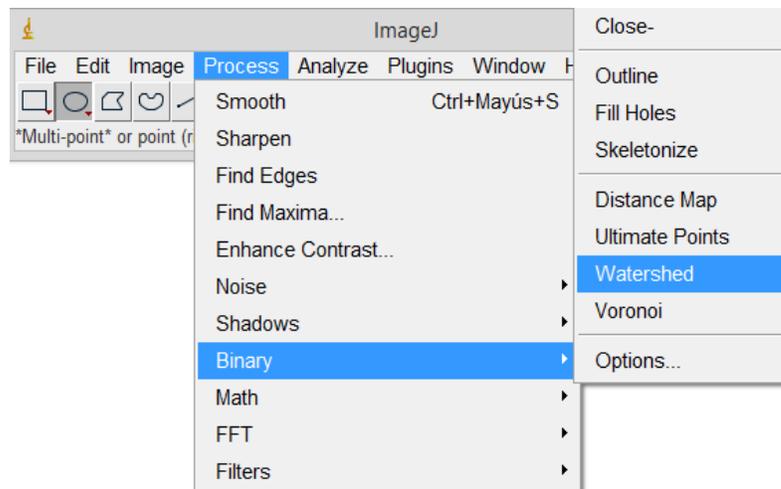
Figura 3.52: Imagen con los puntos de contacto.



Fuente: Elaboración propia

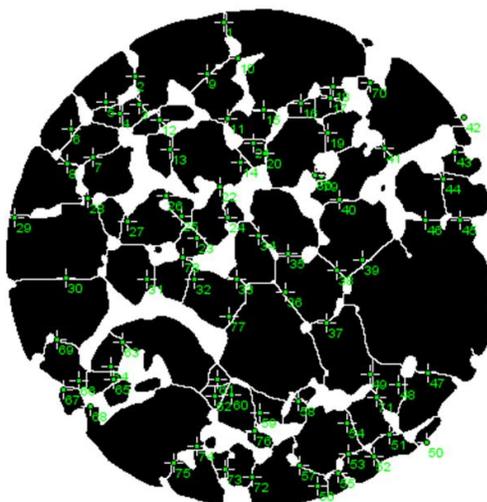
También podemos realizar el análisis de los puntos de contacto cambiando a una imagen binaria (blanco y negro) aplicando una función para hacer que las partículas unidas puedan separarse y así contar con mayor visibilidad.

Figura 3.53: Función para separar las partículas unidas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.53: Imagen con el número de puntos de contacto.



Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas extraídas

El ensayo previsto para medir el módulo dinámico de las mezclas asfálticas es el Edómetro cuyas cargas cíclicas permiten una deformación en la mezcla; como no se dispone de un Edómetro en la universidad se simuló aprovechando el equipo de CBR para ejercer carga constante no cíclica pero que produce la deformación de la mezcla asfáltica como condición dinámica, si bien no es exactamente el tipo de carga cíclica pero ejerce un esfuerzo que provoca dinámicamente la deformación que puede ser medida y evaluada la mezcla asfáltica.

Por lo tanto, se realizó el ensayo a las mezclas asfálticas extraídas de las cuales se extrajeron tres núcleos por tramos a través de la prensa CBR midiendo la deformación a diferentes cargas aplicadas en toda el área del núcleo.

Aplicando la ecuación del anillo granular:

$$x = \frac{y + 0,0068}{0,0004}$$

Donde:

$y$  = Es la deformación (mm)

$x$  = La carga aplicada (kg.)

De la ecuación presentada se obtiene las cargas, aplicadas a los núcleos mediante las lecturas del extensómetro (mm).

Este ensayo buscó comprobar lo dinámico que es el comportamiento de las mezclas asfálticas que a medida que aumenta la carga aumenta el desplazamiento.

Figura 3.54: Prensa CBR para elaborar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.55: Aplicación de carga a diferentes deformaciones.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.56: Medición de las deformaciones.



Fuente: Elaboración propia

### **3.5. Analisis de resultados**

#### **3.5.1 Analisis de especímenes a través de (TC)**

Se realizó 36 especímenes de los cuales 18 fueron elaboradas con agregados que utiliza la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija para sus mezclas asfálticas, cuyos agregados son provenientes de San Blas y Santa Ana lugar de acopio de materiales de La Pintada y las siguientes 18 fueron elaboradas con agregados provinientes de río Canaletas de lugar de acopio Junacas materiales que utiliza SEDECA para sus pavimentos flexibles; el cememto asfáltico convencional que ambas instituciones utilizan es PROBISA - 85/100 de industria chilena.

Los materiales utilizados para la realizacion de los especimenes cumplieron con lo especificado por norma tanto en la caracterizacion de los agregados petreos y calidad del cemento asfáltico; los resultados de los ensayos respectivos se encuentran a detalle en anexos 1 y 2.

La curva granulométrica formada por los agregados se encuentra dentro de los límites mínimo y máximo establecidos por la AASTHO .

Las tablas de los resultados presenta los valores Marshall obtenidos del diseño de la mezcla asfáltica realizada para cada banco de materiales.

Tabla 3.19: Valores Marshall obtenidos del diseño H.A.M

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
<b>Determinación del porcentaje óptimo del cemento asfáltico</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	4830,746	5,57
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,351	5,59
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	5,48
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio</b>	<b>5,54</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20: Valores Marshall obtenidos del diseño SEDECA

	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de Diseño</b>	<b>% de C.A.</b>
<b>Determinación del porcentaje óptimo del cemento asfáltico</b>	Estabilidad Marshall (Lb)	3738,310	5,20
	Densidad máxima (gr/cm <sup>3</sup> )	2,356	5,59
	Vacíos de la mezcla (%)	4,000	6,00
	<b>% Porcentaje óptimo de C.A.</b>	<b>Promedio</b>	<b>5,60</b>

Fuente: Elaboración propia

## Especímenes elaborados con agregados (H.A.M.)

### Análisis de porcentaje de vacíos:

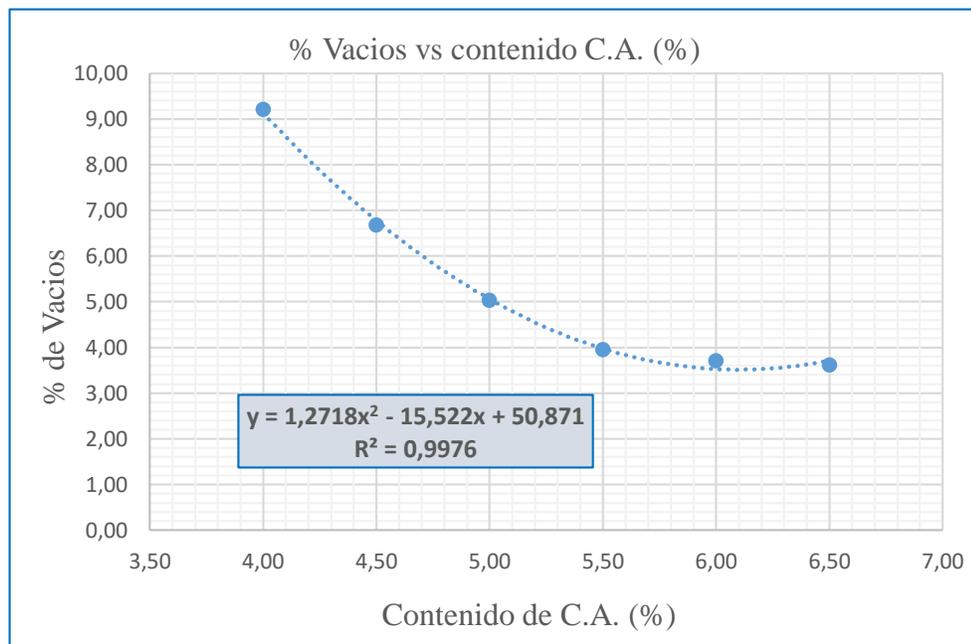
### Porcentaje de vacíos en la mezcla obtenida por el método Marshall:

Tabla 3.21: Valores % vacíos Marshall

(%) Contenido de C.A.	% de vacíos
4,00	9,205
4,50	6,677
5,00	5,030
5,50	3,949
6,00	3,707
6,50	3,616

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.57: % Vacíos método Marshall



Fuente: Elaboración propia

**Porcentaje de vacíos en la mezcla obtenidos a través de las imágenes (TC):**

Se realizó dos cortes transversales para cada briqueta, es decir, dos imágenes de tomografía computarizada por briqueta de la cual se sacó un promedio de estos dos valores de cada corte.

Tabla 3.22: Valores % vacíos del análisis de (TC)

N° briqueta	N° de imagen transversal	Contenido de C.A. %	% de Vacíos
1	1	4,00	9,290
	2		9,320
2	3	4,50	6,740
	4		6,690
3	5	5,00	5,400
	6		5,240
4	7	5,50	4,120
	8		4,080
5	9	6,00	3,730
	10		3,780
6	11	6,50	3,680
	12		3,800

Fuente: Elaboración propia

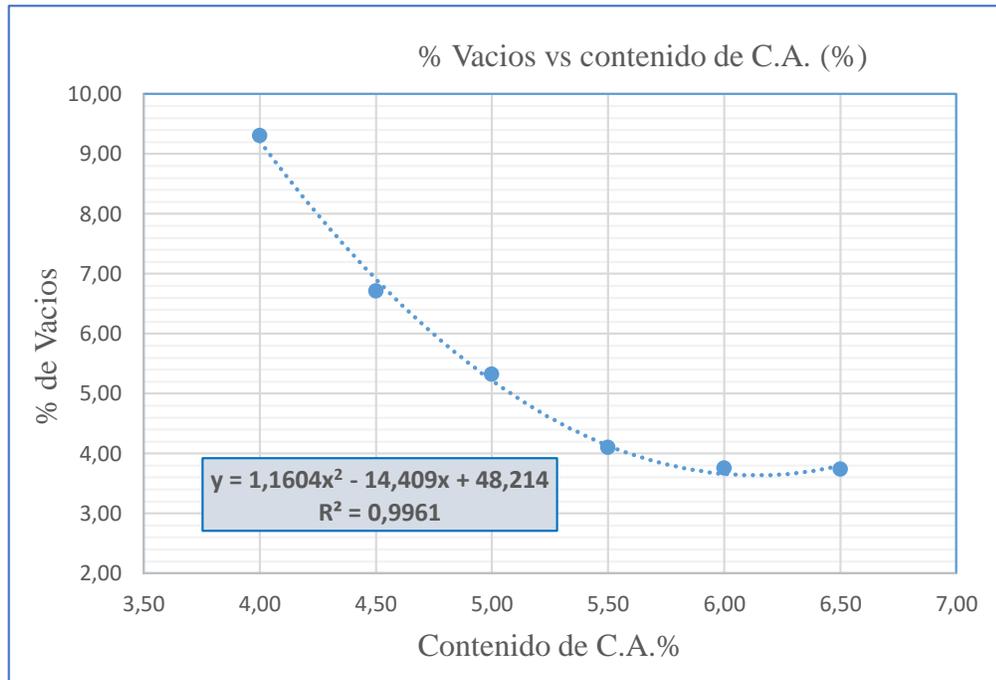
Tabla 3.23: Promedio de % vacíos (TC)

Contenido de C.A.%	Promedio de % vacíos
4,00	9,305
4,50	6,715
5,00	5,320
5,50	4,100
6,00	3,755
6,50	3,740

Fuente: Elaboración propia

Relación de porcentaje de vacíos en la mezcla obtenidos a través de las imágenes digitales y contenido de cemento asfáltico:

Figura 3.58: % Vacíos (TC) vs contenido de C.A. %



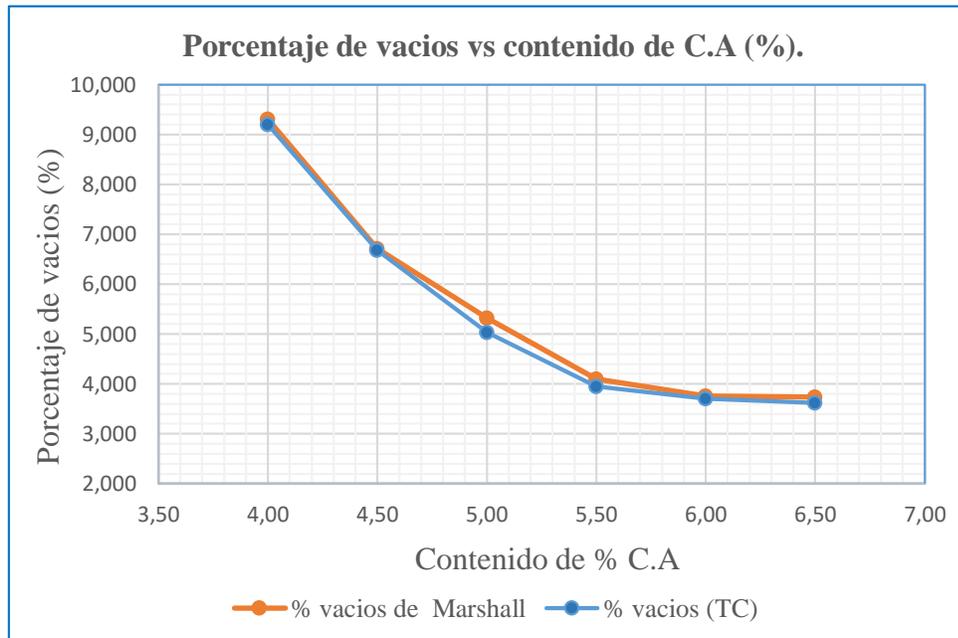
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24: Comparación de obtención % vacíos

Contenido de C.A. %	% de vacíos (TC)	% de vacíos Marshall
4,00	9,305	9,205
4,50	6,715	6,677
5,00	5,320	5,030
5,50	4,100	3,949
6,00	3,755	3,707
6,50	3,740	3,616

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.59: % Vacíos método Marshall vs % vacíos (TC)



Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.59 comparamos la obtención del porcentaje de vacíos por medio de los dos métodos por método Marshall e imágenes digitales por tomografía computarizada, de la cual se observa que se obtiene valores mayores de porcentajes de vacíos obtenidos por las imágenes digitales, donde la variación máxima es de 0,29 % y la mínima variación es de 0,038 %.

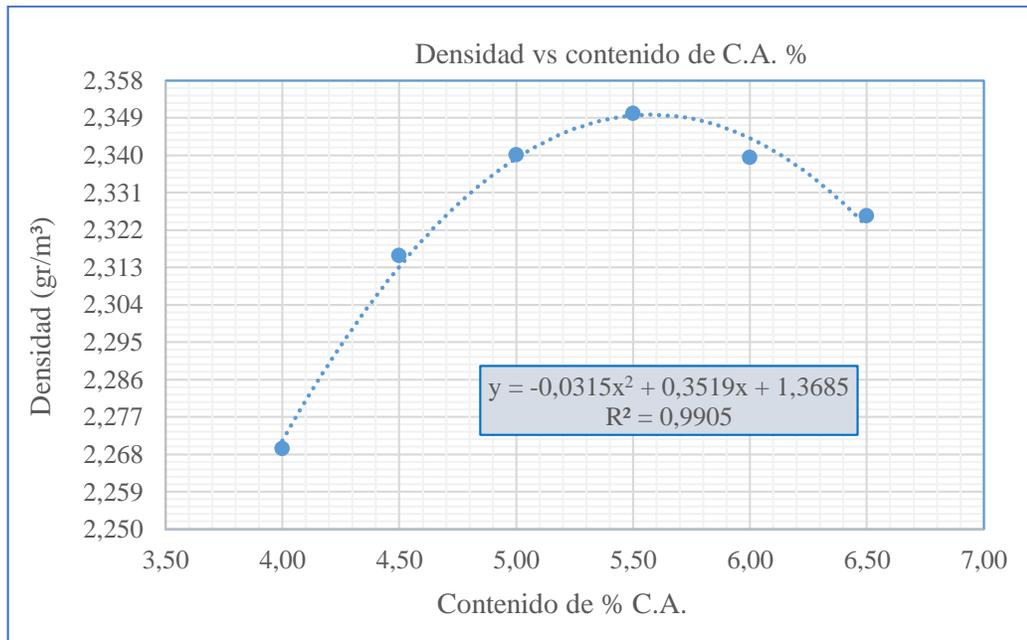
#### Relación de densidad y porcentaje de vacíos:

Tabla 3.25: Densidad obtenida por método Marshall

Contenido de C.A. %	Densidad (gr/m3)
4,00	2,270
4,50	2,320
5,00	2,340
5,50	2,350
6,00	2,340
6,50	2,330

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.60: Densidad vs contenido de C.A. %



Fuente: Elaboración propia

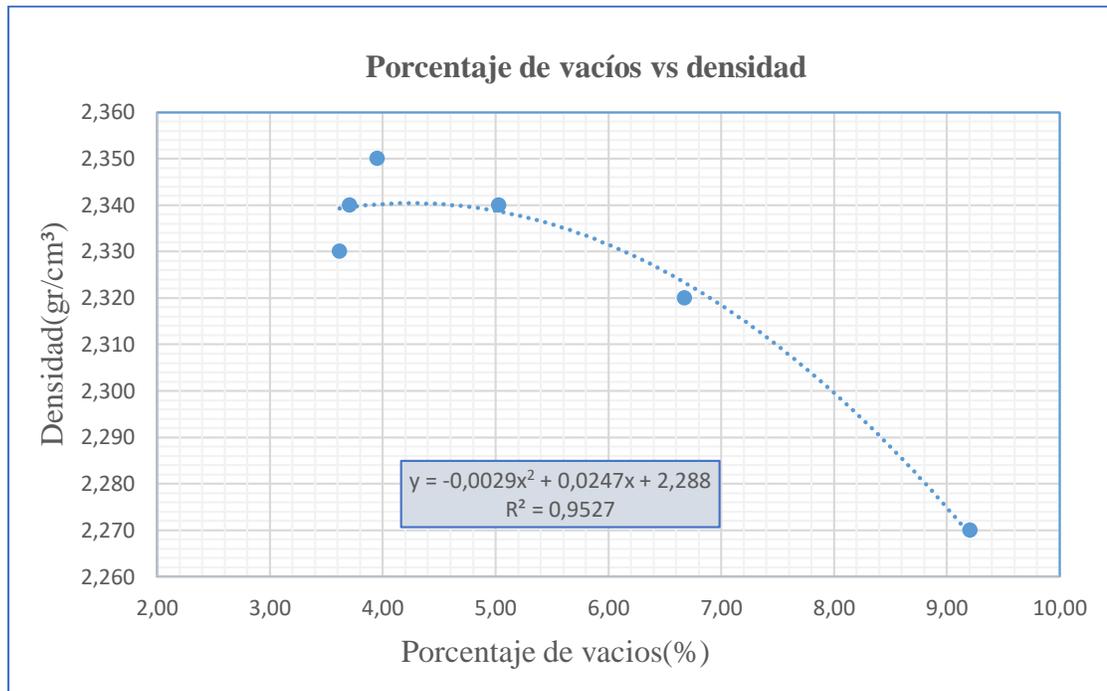
Relación de densidad obtenida y porcentaje de vacíos obtenidos por método Marshall:

Tabla 3.26: Densidad vs % de vacíos

Contenido de C.A. %	Densidad (gr/m3)	% vacíos (Marshall)
4,00	2,270	9,205
4,50	2,320	6,677
5,00	2,340	5,030
5,50	2,350	3,949
6,00	2,340	3,707
6,50	2,330	3,616

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.61: Densidad vs % vacíos



Fuente: Elaboración propia

De la ecuación de la relación densidad vs % de vacíos (Marshall):

$$y = -0,0029x^2 + 0,0257x + 2,288 \quad \text{Ec. (1)}$$

y = Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)

x = porcentaje de vacíos

Esta ecuación se utilizará para obtener la densidad de las mezclas asfálticas extraídas de tramos realizados por la HAM, una vez teniendo los porcentajes de vacíos.

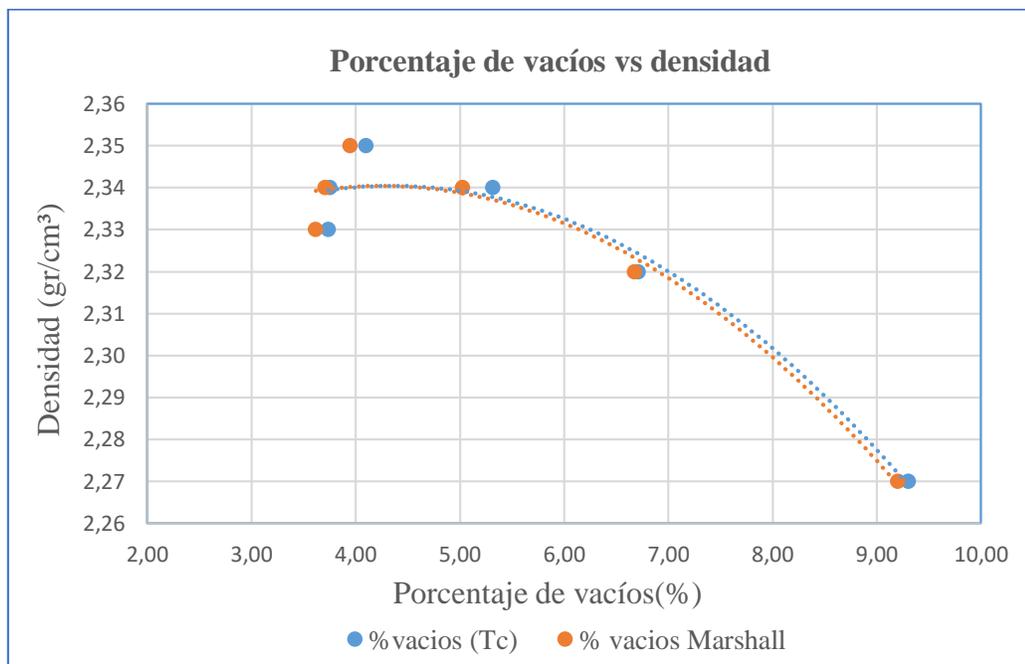
De la comparación de la relación densidad y el porcentaje de vacíos obtenidos tanto por la tomografía computarizada y por el método Marshall se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 3.27: Comparación de densidad vs % de vacíos

Densidad (gr/m3)	% vacíos (TC)	% vacíos (Marshall)
2,270	9,305	9,205
2,320	6,715	6,677
2,340	5,320	5,03
2,350	4,100	3,949
2,340	3,755	3,707
2,330	3,740	3,616

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.62: Comparación de densidad vs % vacíos



Fuente: Elaboración propia

De la figura 3.62 la comparación de la relación de porcentaje de vacíos obtenidos por TC y Marshall vs densidad podemos observar:

La diferencia entre la densidad máxima y mínima es de 0,08

La diferencia del % de vacíos (TC) es de 5,565 %

La diferencia del % de vacíos Marshall es de 5,589 %

## Relación de puntos de contactos de agregados y estabilidad

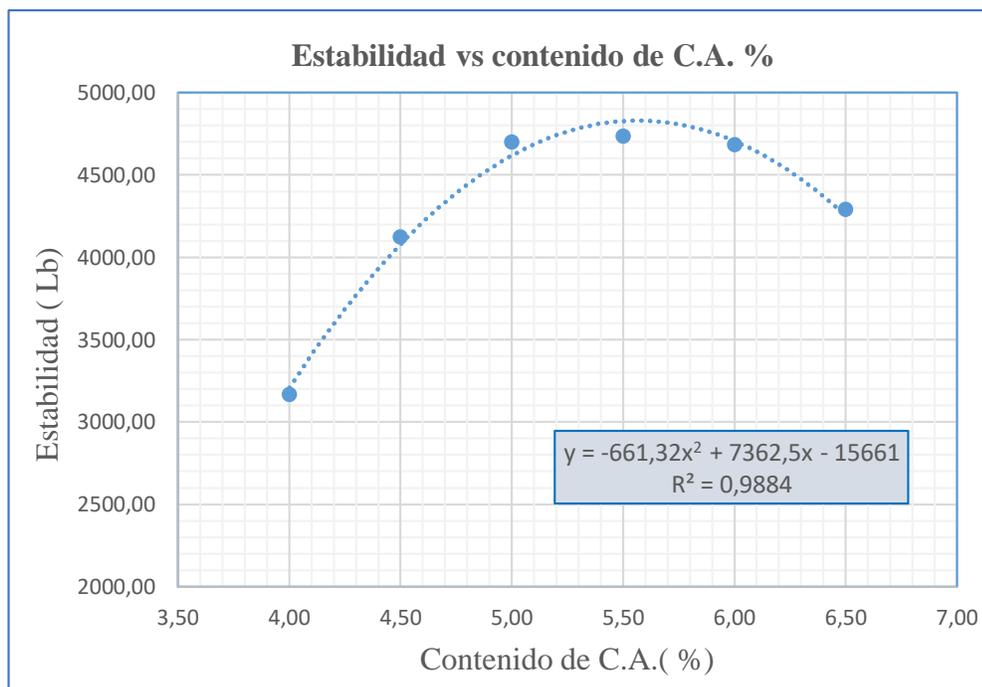
Estabilidad obtenida por el método Marshall:

Tabla 3.28: Estabilidad (lb) obtenida método Marshall

Contenido C.A. %	Estabilidad (Libras)
4,00	3166,112
4,50	4121,784
5,00	4699,386
5,50	4733,288
6,00	4680,912
6,50	4288,859

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.63: Estabilidad vs contenido de C.A. %



Fuente: Elaboración propia

Número de puntos de contacto de agregados en la mezcla obtenidos a través de las imágenes digitales (TC) para diferentes contenidos de cemento asfáltico:

Tabla 3.29: Puntos de contacto de agregados (TC)

N° briqueta	N° de imagen transversal	% C.A.	Puntos de contacto agregados
1	1	4,00	80,00
	2		82,00
2	3	4,50	86,00
	4		84,00
3	5	5,00	95,00
	6		98,00
4	7	5,50	100,00
	8		97,00
5	9	6,00	96,00
	10		94,00
6	11	6,50	88,00
	12		89,00

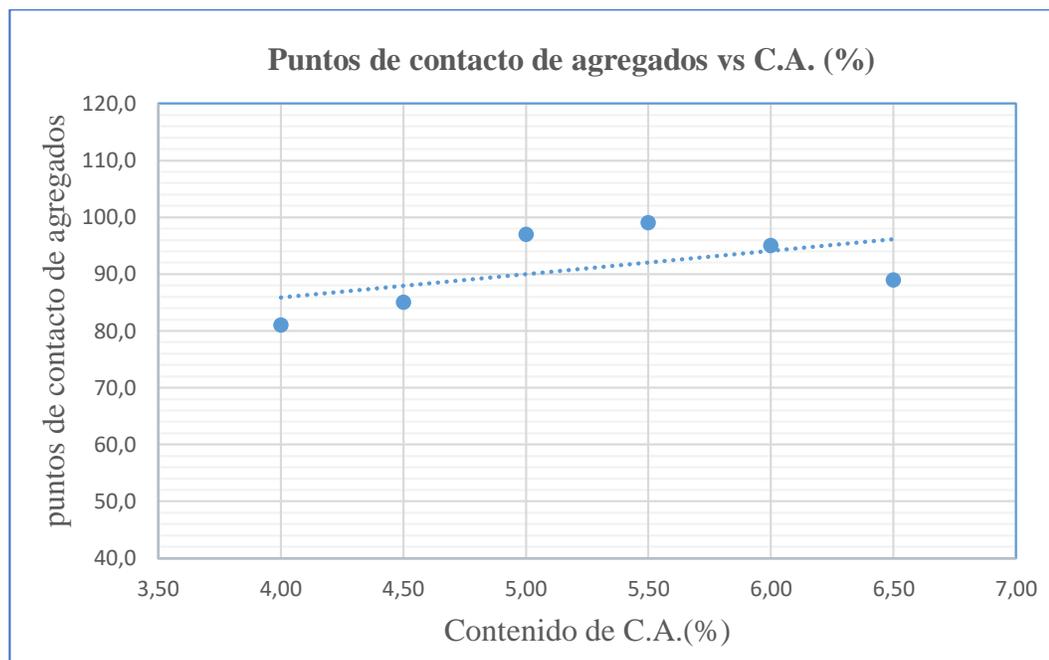
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30: Promedio de puntos de contacto de agregados

Contenido de C.A. %	Puntos de contacto de agregados
4,00	81,00
4,50	85,00
5,00	97,00
5,50	99,00
6,00	95,00
6,50	89,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.64: Puntos de contacto de agregados vs contenido de C.A.%



Fuente: Elaboración propia

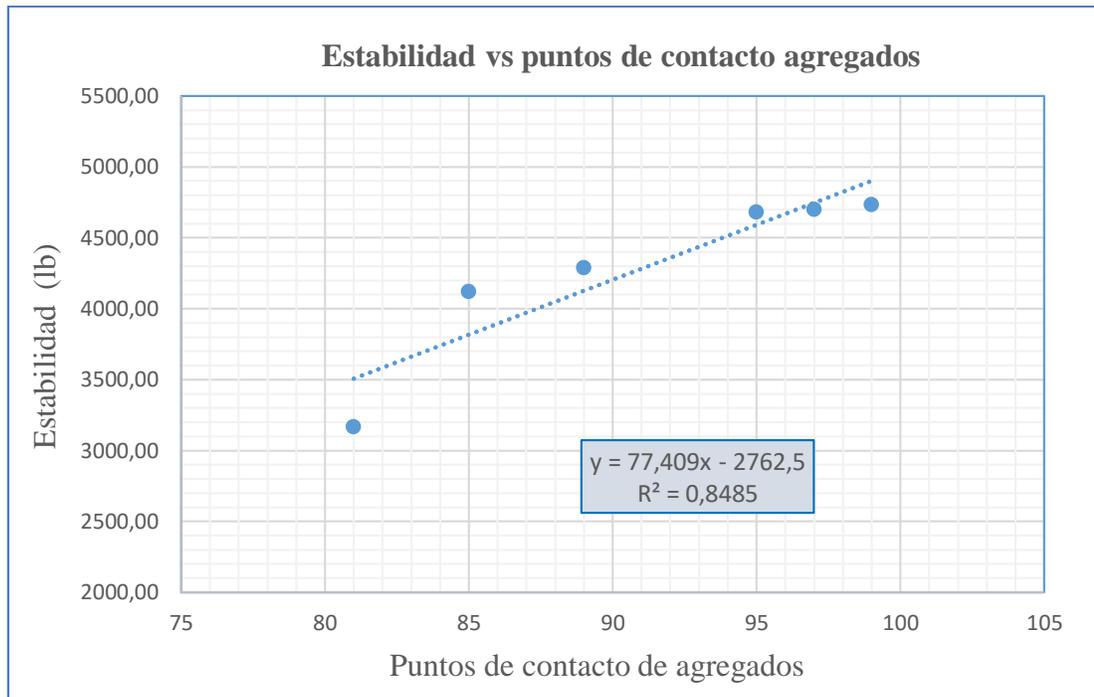
Relación de número de contactos de agregados obtenido a través de las imágenes digitales y estabilidad obtenida de método Marshall.

Tabla 3.31: Relación estabilidad y puntos de contacto de agregados

Puntos de contacto Agregado	Estabilidad (Libras)
81,000	3166,112
85,000	4121,784
97,000	4699,386
99,000	4733,288
95,000	4680,912
89,000	4288,859

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.65: Estabilidad vs puntos de contacto de agregados



Fuente: Elaboración propia

Ecuación de la relación estabilidad vs número de puntos de contacto agregados:

$$y = 77,409x - 2762,5 \quad \text{Ec. (2)}$$

y = Estabilidad (Lb)

x = puntos de contacto de agregados

De esta ecuación se determinará la estabilidad de las mezclas asfálticas extraídas de tramos de HAM una vez obtenidos puntos de contacto de agregados por tomografía computarizada de cada mezcla asfáltica.

## Especímenes elaborados con agregados (SEDECA)

### Análisis de porcentaje de vacíos:

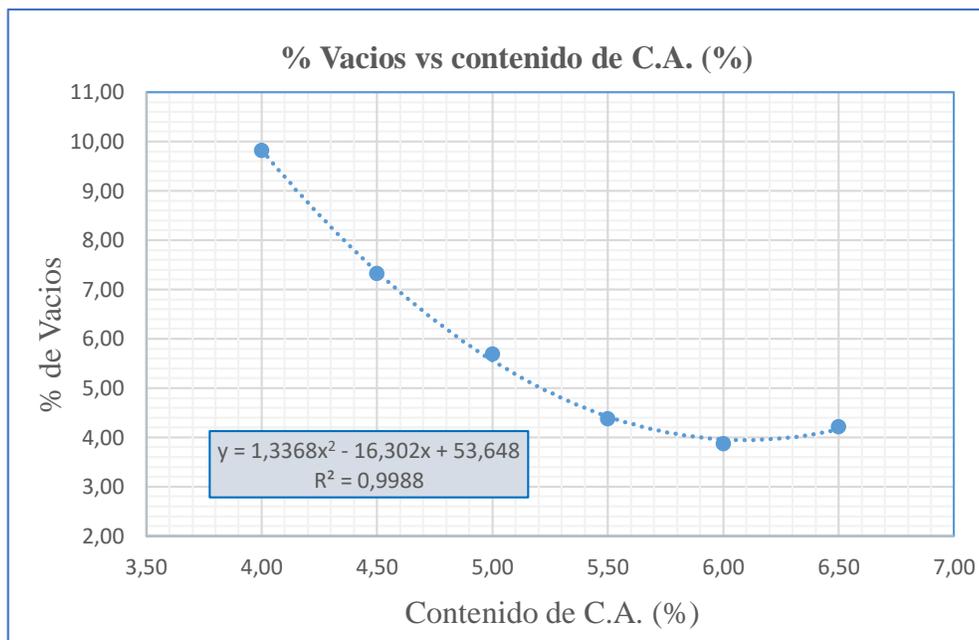
### Porcentaje de vacíos en la mezcla obtenidos por el método Marshall:

Tabla 3.32: Valores % vacíos Marshall

Contenido C.A. (%)	% de Vacíos
4,00	9,816
4,50	7,322
5,00	5,690
5,50	4,376
6,00	3,872
6,50	4,219

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.66: % Vacíos método Marshall



Fuente: Elaboración propia

### Porcentaje de vacíos en la mezcla obtenidos a través de las imágenes (TC):

Se realizó dos cortes transversales para cada briqueta, es decir, dos imágenes de tomografía computarizada por briqueta de las cuales se sacó un promedio de estos dos valores de cada corte.

Tabla 3.33: Valores % vacíos del análisis de (TC)

N° briqueta	N° de imagen transversal	Contenido de C.A. (%)	% de Vacíos
1	1	4,00	9,980
	2		9,930
2	3	4,50	7,490
	4		7,530
3	5	5,00	5,820
	6		5,770
4	7	5,50	4,470
	8		4,420
5	9	6,00	3,910
	10		3,990
6	11	6,50	4,370
	12		4,340

Fuente: Elaboración propia

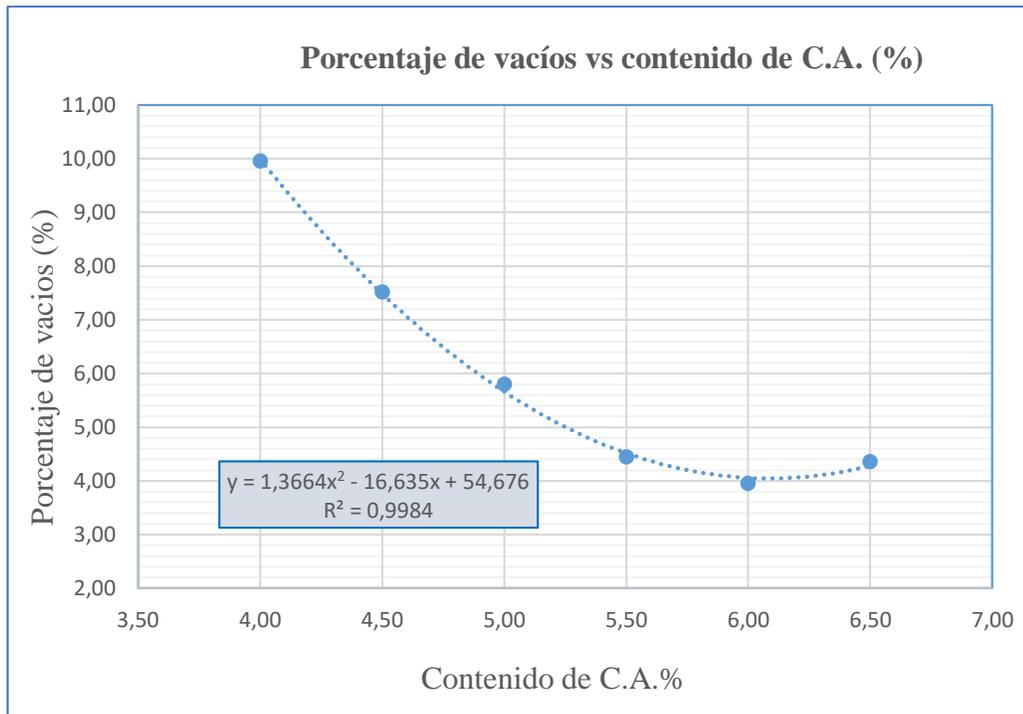
Relación de porcentaje de vacíos en la mezcla obtenidos a través de las imágenes digitales y contenido de cemento asfáltico:

Tabla 3.34: Promedio de % vacíos (TC)

Contenido de C.A. %	% de vacíos
4,00	9,955
4,50	7,510
5,00	5,795
5,50	4,445
6,00	3,950
6,50	4,355

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.67: % Vacíos vs contenido de C.A. % (TC)



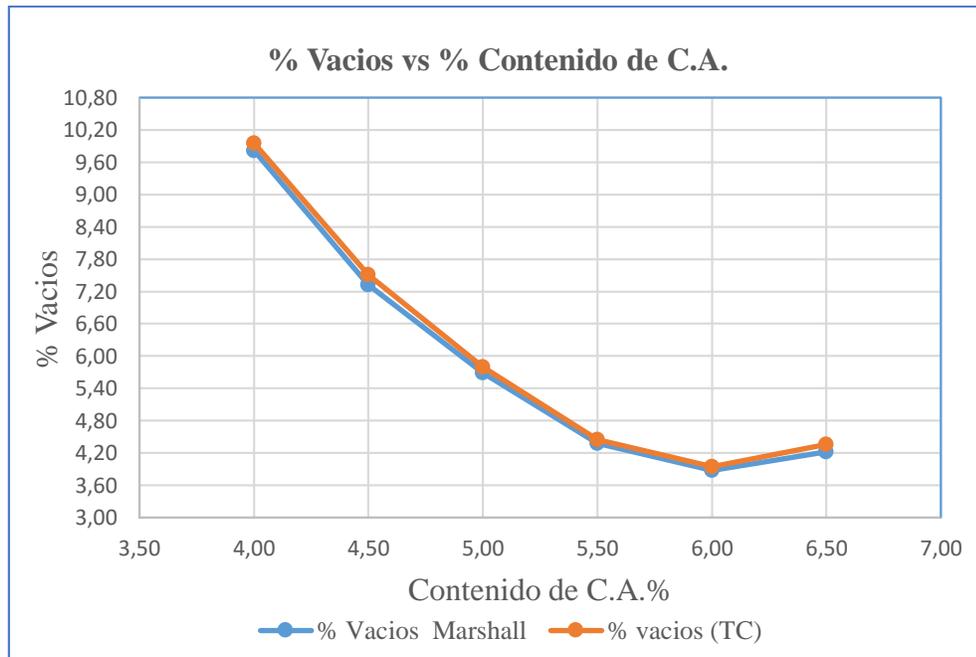
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35: Comparación de obtención % vacíos

Contenido de C.A. %	% de vacíos (Tc)	% de vacíos Marshall
4,00	9,955	9,816
4,50	7,510	7,322
5,00	5,795	5,690
5,50	4,445	4,376
6,00	3,950	3,872
6,50	4,355	4,219

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.68: % Vacíos método Marshall vs % vacíos (TC)



Fuente: Elaboración propia

De la figura 3.68 donde comparamos la obtención del porcentaje de vacíos por medio de los dos métodos por método Marshall e imágenes digitales por tomografía computarizada, de la cual se observa que se obtiene valores mayores de porcentajes de vacíos obtenidos por las imágenes digitales, donde la variación máxima es de 0,188 % y la mínima es de 0,069 %.

### Relación de densidad y porcentaje de vacíos:

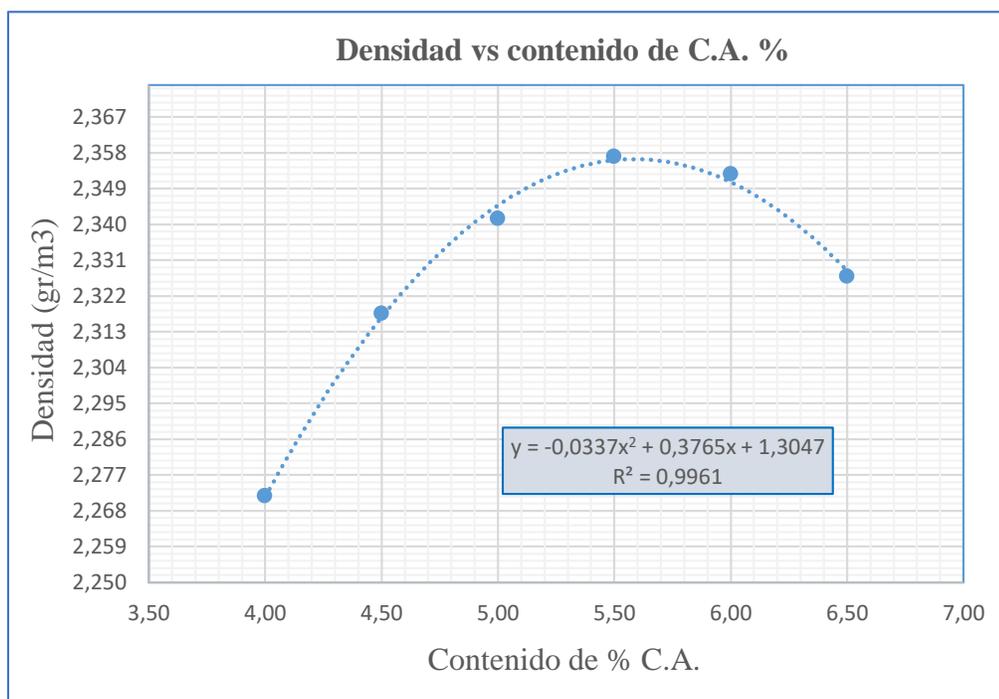
Densidad de la mezcla obtenidos por el método Marshall:

Tabla 3.36: Densidad obtenida por método Marshall

Contenido de C.A. %	Densidad (gr/m <sup>3</sup> )
4,00	2,27
4,50	2,32
5,00	2,34
5,50	2,36
6,00	2,35
6,50	2,33

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.69: Densidad vs contenido de C.A. %



Fuente: Elaboración propia

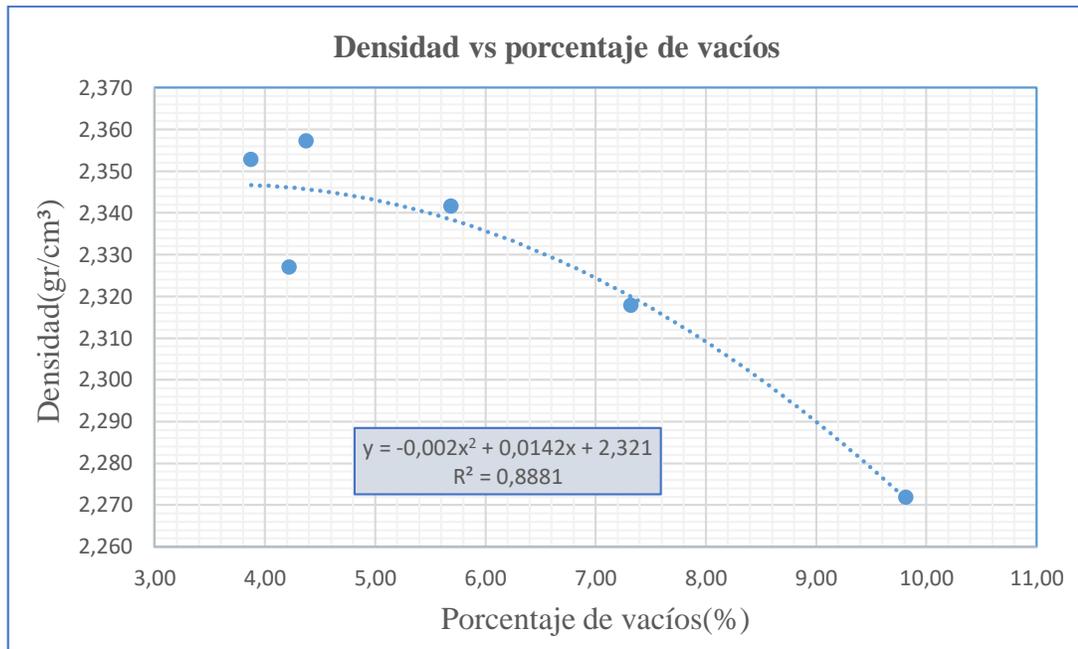
Relación de densidad y porcentaje de vacíos obtenidos por el método Marshall:

Tabla 3.37: Densidad vs % de vacíos

Contenido de C.A. %	Densidad (gr/m³)	% vacíos Marshall
4,00	2,272	9,816
4,50	2,318	7,322
5,00	2,342	5,690
5,50	2,357	4,376
6,00	2,353	3,872
6,50	2,327	4,219

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.70: Densidad vs % vacíos



Fuente: Elaboración propia

De la ecuación de la relación densidad vs % de vacíos:

$$y = -0,002x^2 + 0,0142x + 2,321 \quad \text{Ec. (3)}$$

y = Densidad (gr/cm³)

x = porcentaje de vacíos

Esta ecuación se utilizará para obtener la densidad de las mezclas asfálticas extraídas de tramos realizados por la SEDECA, una vez teniendo los porcentajes de vacíos.

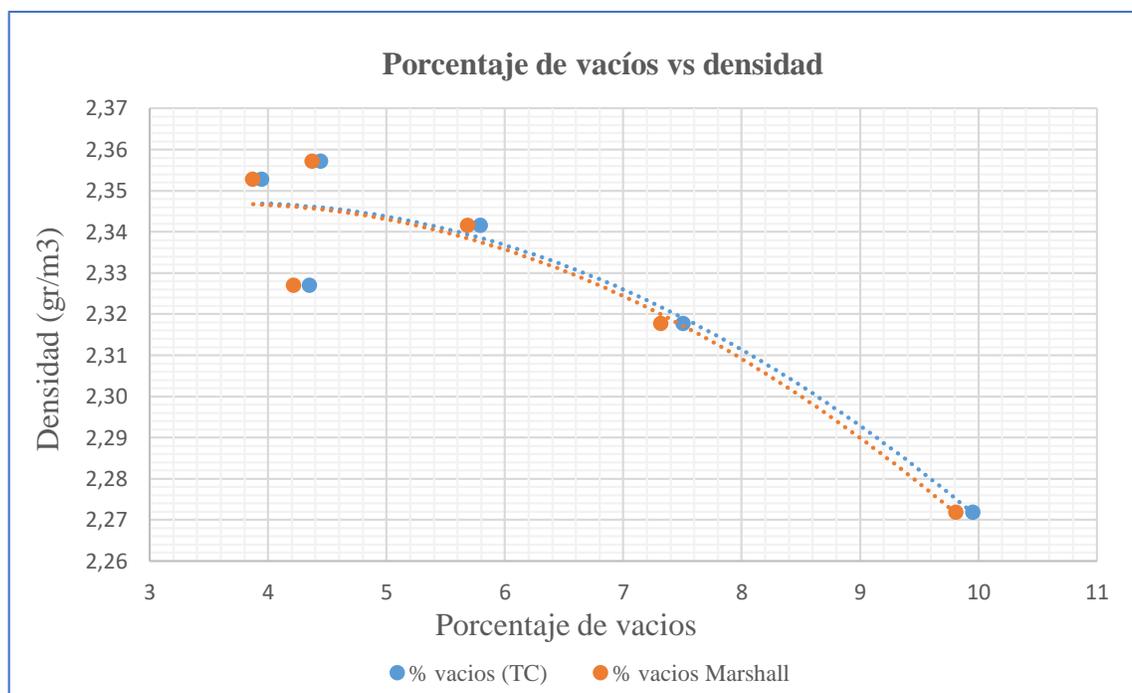
De la comparación de la relación densidad y el porcentaje de vacíos obtenidos tanto por la tomografía computarizada y por el método Marshall se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 3.38: Densidad (Marshall) vs % de vacíos

Densidad (gr/m <sup>3</sup> )	% de vacíos (TC)	% de vacíos Marshall
2,270	9,955	9,816
2,320	7,510	7,322
2,340	5,795	5,690
2,360	4,445	4,376
2,350	3,950	3,872
2,330	4,355	4,219

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.71: Comparación de densidad vs % vacíos



Fuente: Elaboración propia

De la figura 3.71 la comparación de la relación de porcentaje de vacíos obtenidos por tomografía computarizada y Marshall vs densidad, podemos observar:

La diferencia entre la densidad máxima y mínima es de 0,09

La diferencia del % de vacíos (TC) es de 6,005 %

La diferencia del % de vacíos Marshall es de 5,944 %

## Relación de puntos de contactos de agregados y estabilidad

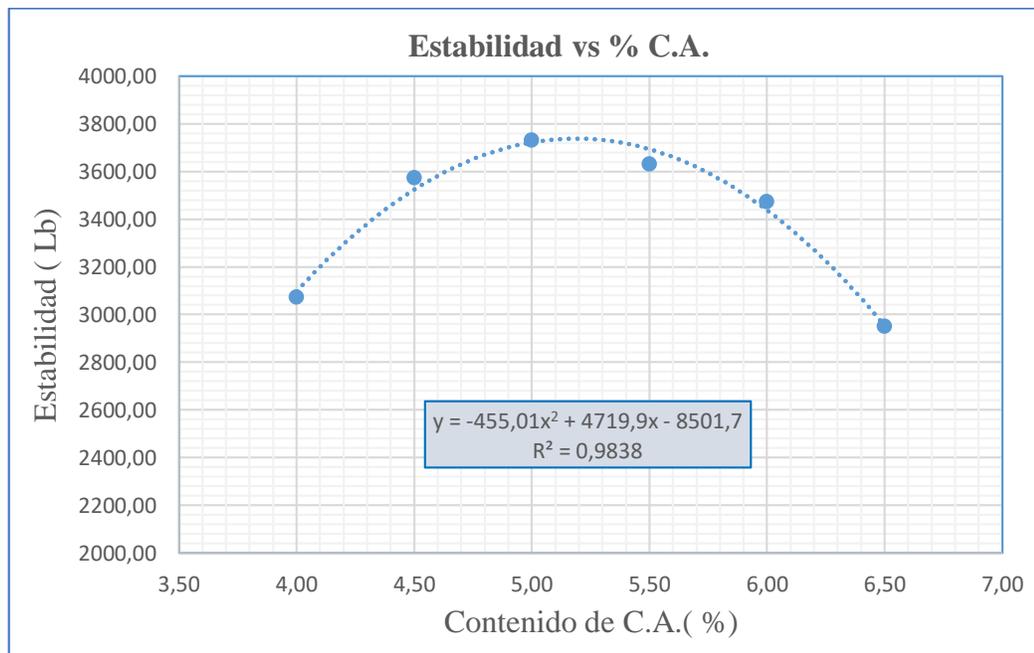
Estabilidad obtenida por el método Marshall:

Tabla 3.39: Estabilidad (lb) obtenida método Marshall

Contenido C.A. %	Estabilidad (Libras)
4,00	3072,851
4,50	3571,780
5,00	3729,780
5,50	3630,626
6,00	3472,358
6,50	2950,277

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.72: Estabilidad vs contenido de C.A. %



Fuente: Elaboración propia

Número de puntos de contacto de agregados en la mezcla obtenidos a través de las imágenes digitales (Tc) para diferentes contenidos de cemento asfáltico:

Tabla 3.40: Puntos de contacto de agregados

N° briqueta	N° de imagen transversal	%C.A.	Puntos de contacto agregados
1	1	4,00	84,00
	2		82,00
2	3	4,50	84,00
	4		87,00
3	5	5,00	92,00
	6		90,00
4	7	5,50	91,00
	8		93,00
5	9	6,00	88,00
	10		86,00
6	11	6,50	80,00
	12		82,00

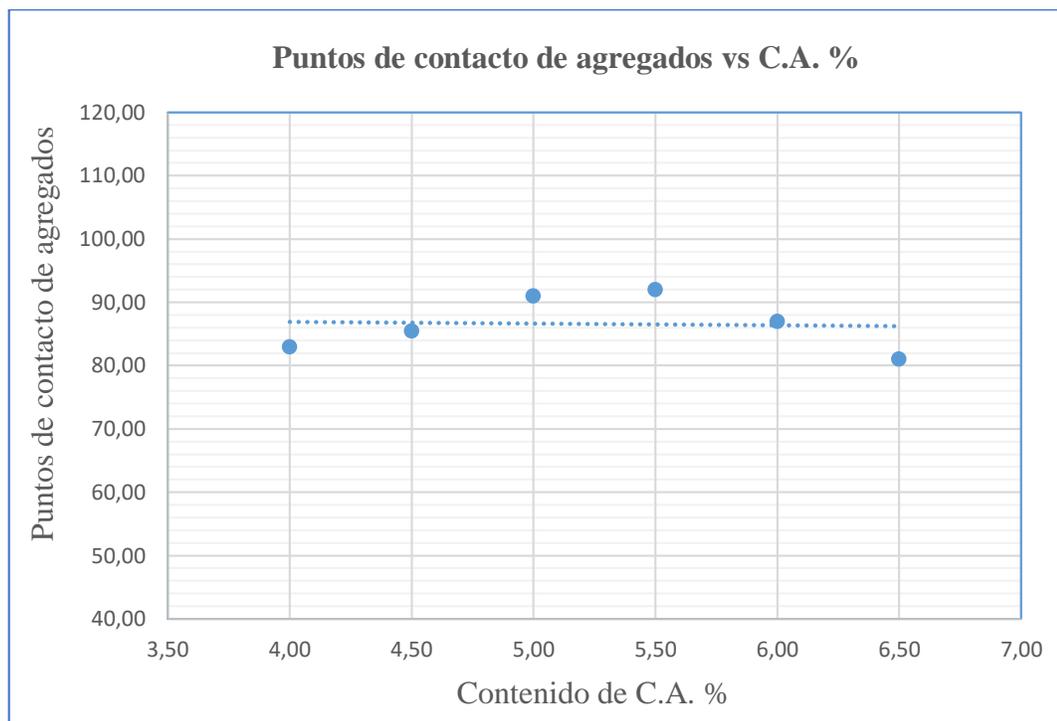
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41: Promedio puntos de contacto agregados

Contenido de C.A. %	Puntos de contacto de agregados
4,00	83,00
4,50	86,00
5,00	91,00
5,50	92,00
6,00	87,00
6,50	81,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.73: Puntos de contacto de agregados vs contenido de C.A. %



Fuente: Elaboración propia

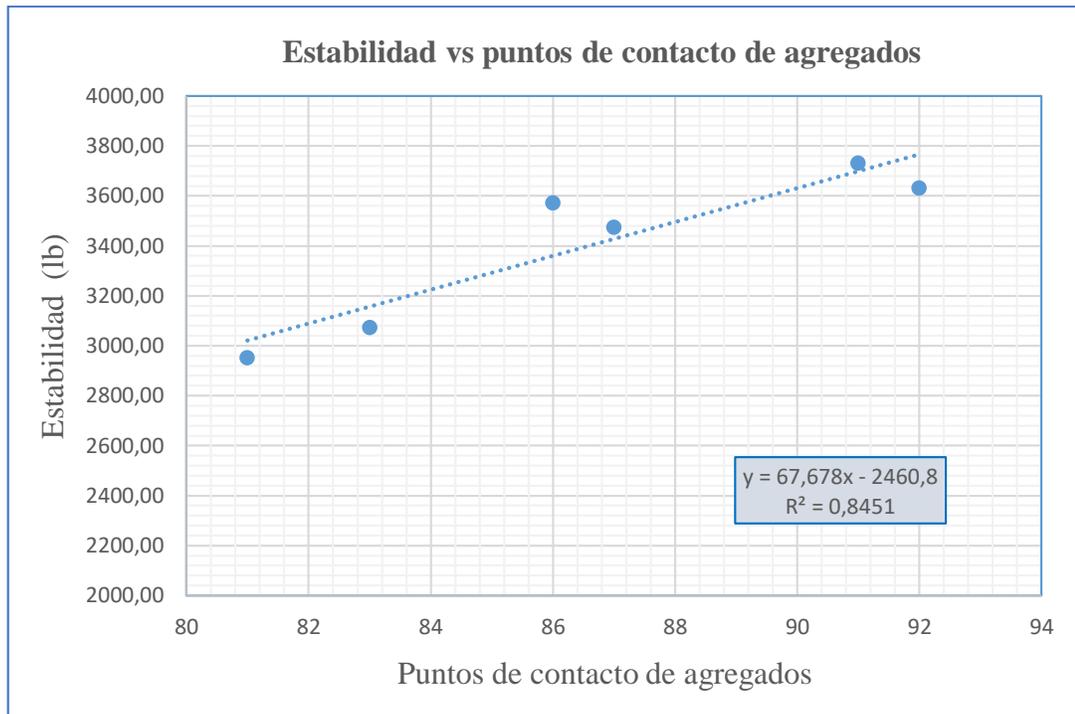
Relación de número de contactos de agregados obtenido a través de las imágenes digitales y estabilidad obtenida de método Marshall.

Tabla 3.42: Relación estabilidad y puntos de contacto de agregados

Puntos Contacto agregados	Estabilidad (Libras)
79,00	3072,851
86,50	3571,780
95,00	3729,780
100,00	3630,626
98,00	3472,358
101,00	2950,277

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.74: Estabilidad vs puntos de contacto de agregados



Fuente: Elaboración propia

Ecuación de la relación estabilidad vs número de puntos de contacto agregados:

$$y = 67,678x - 2460,80 \quad \text{Ec. (4)}$$

y = Estabilidad (Lb)

x = puntos de contacto de agregados

De esta ecuación se determinará la estabilidad de las mezclas asfálticas extraídas de tramos de SEDECA una vez obtenidos puntos de contacto de agregados por tomografía computarizada.

### 3.5.2 Análisis de núcleos extraídos a través de (TC)

La extracción de núcleos se realizó a los tres bolillos cada 100 m de los tramos siguientes: avenida Triple Vía, calle Campero, calle Delio Echazú, avenida Felipe Palazón calle Campero, calle Bolívar, calle O'connor; pavimentos realizadas por la Alcaldía Municipal de la ciudad de Tarija y de tramos carreteros que son Tarija - Puerta el Chaco; Puerta Chaco - Puente Jarcas; Puente Jarcas - Piedra Larga; Piedra Larga - Canaletas los cuales son elaborados por SEDECA.

Estos núcleos son analizados a través de las imágenes digitales por medio del software ImageJ donde podemos observar el % de vacíos, contacto agregado - agregado.

### 3.5.2.1 Analisis de porcentaje de vacíos

Núcleos extraídos de tramos de H.A.M.

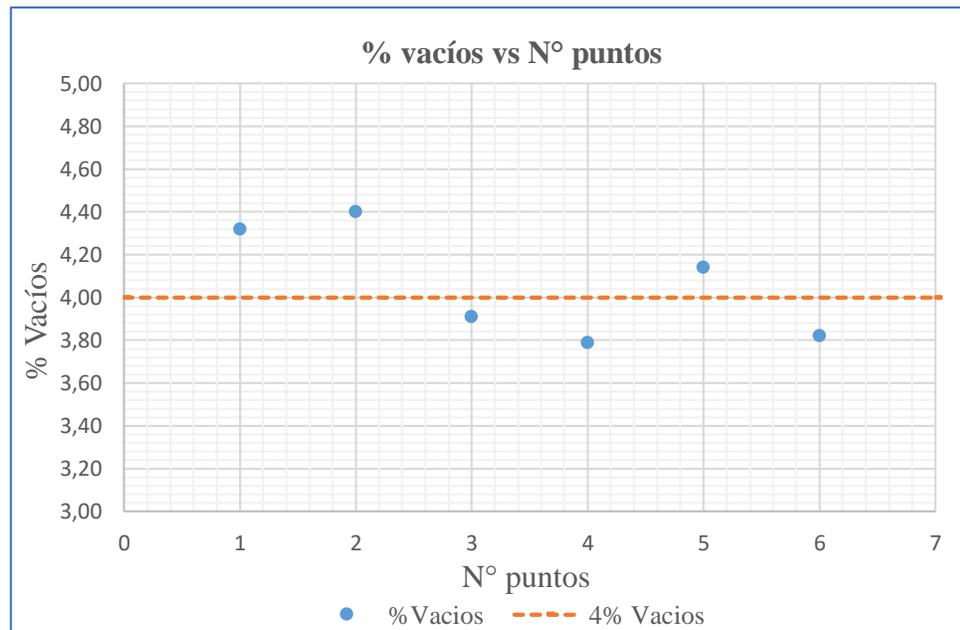
**Tramo N°1: avenida Triple Vía**

Tabla 3.43: % de vacíos tramo avenida Triple Vía

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,32
	2	4,40
2	3	3,91
	4	3,79
3	5	4,14
	6	3,82
<b>Valor medio</b>		<b>4,06</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.75: % vacíos tramo avenida Triple Vía.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de la avenida Triple Vía se tiene un valor medio de 4,06 % de vacíos, lo cual se encuentra dentro de lo establecido en la norma que es de 3 a 5 % de vacíos.

Para el diseño de la mezcla asfáltica se realizó con el promedio de los límites de vacíos de aire que es de 4 %, por lo cual del análisis obtuvo un valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica de 4,40 % y mínimo 3,79 %.

El conjunto de datos presenta una dispersión respecto a la media de 0,262 y una variabilidad de 0,069 y un coeficiente de variación de 0,064.

De acuerdo con el diseño del 4 % de vacíos, podemos observar en la figura 3.75 que tenemos 3 valores inferiores y los demás valores superiores a lo establecido por diseño.

De la relación de densidad y porcentaje de vacíos obtenidos por método Marshall, es decir con la ecuación (1), obtenemos la densidad de la mezcla.

De la ecuación:

$$y = -0,0029x^2 + 0,0247x + 2,288$$

Donde:

y= densidad (gr/m<sup>3</sup>)

x= % vacíos

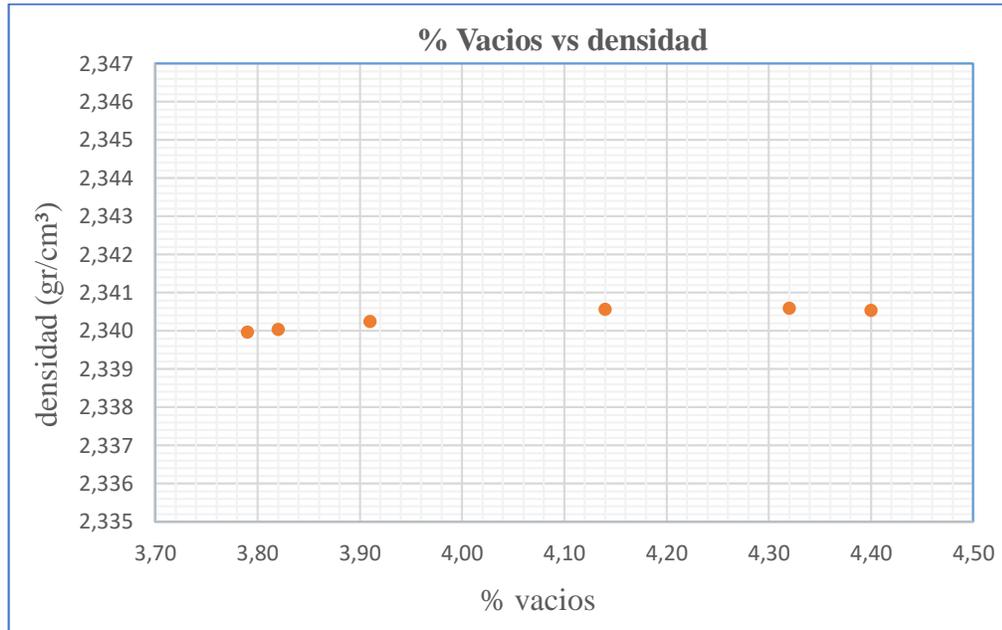
Entonces la densidad de la mezcla extraída del tramo Triple Vía es:

Tabla 3.44: Densidad de tramo avenida Triple Vía

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,32	2,34058
4,40	2,34054
3,91	2,34024
3,79	2,33996
4,14	2,34055
3,82	2,34004

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.76: Densidad tramo avenida Triple Vía.



Fuente: Elaboración propia

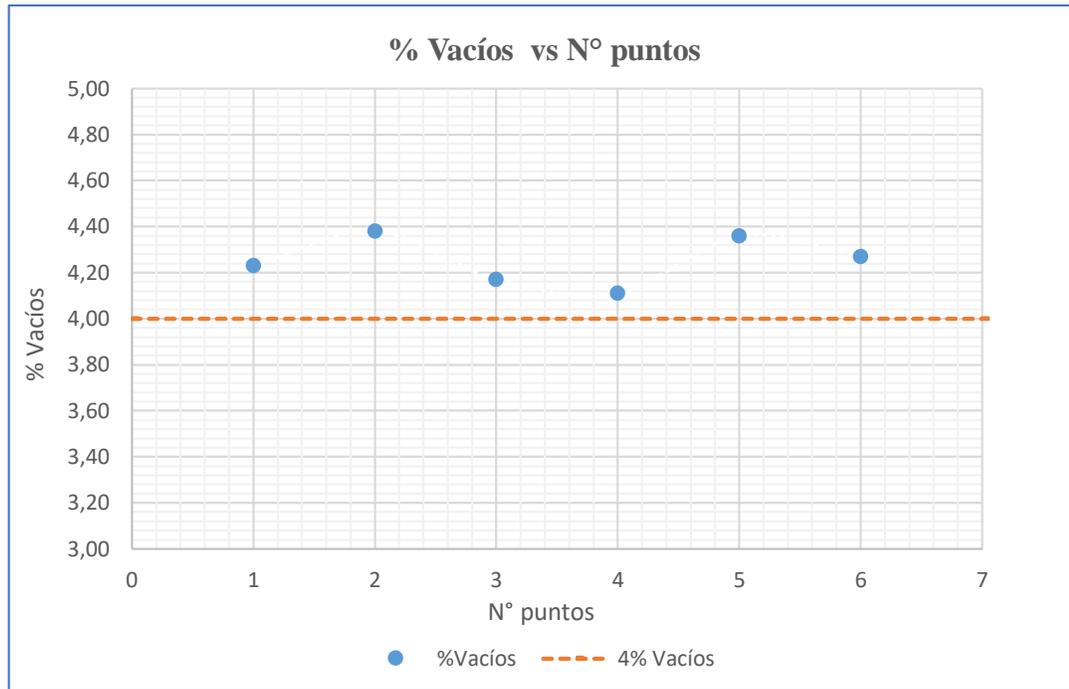
**Tramo N°2: calle Delio Echazú**

Tabla 3.45: % vacíos tramo calle Delio Echazú

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,23
	2	4,38
2	3	4,17
	4	4,11
3	5	4,36
	6	4,27
<b>Valor medio</b>		<b>4,25</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.77: % vacíos tramo calle Delio Echazú.



Fuente: Elaboración propia

El análisis de esta muestra obtenida de la calle Delio Echazú se tiene un valor medio de 4,25% por lo cual el valor medio se encuentra sobre el porcentaje de vacíos de diseño que es de 4% El valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,38 % y mínimo 4,11 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,106, una variabilidad de 0,011 y un coeficiente de variación de 0,025.

Podemos observar que todos los valores se encuentran superiores al 4 % de vacíos por lo cual esta mezcla no se encuentra con el porcentaje de vacíos a la cual se diseñó.

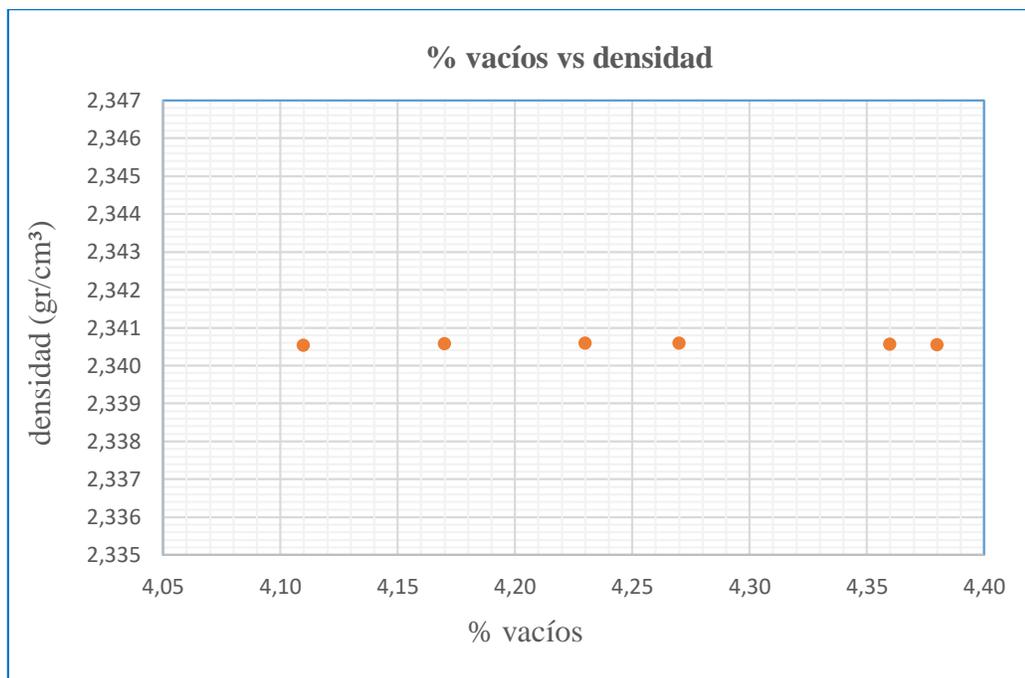
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales y utilizando la ecuación (1) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída de la calle Delio Echazú.

Tabla 3.46: Densidad tramo calle Delio Echazú.

% vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,23	2,34058
4,38	2,34055
4,17	2,34057
4,11	2,34053
4,36	2,34056
4,27	2,34059

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.78: Densidad tramo calle Delio Echazú.



Fuente: Elaboración propia

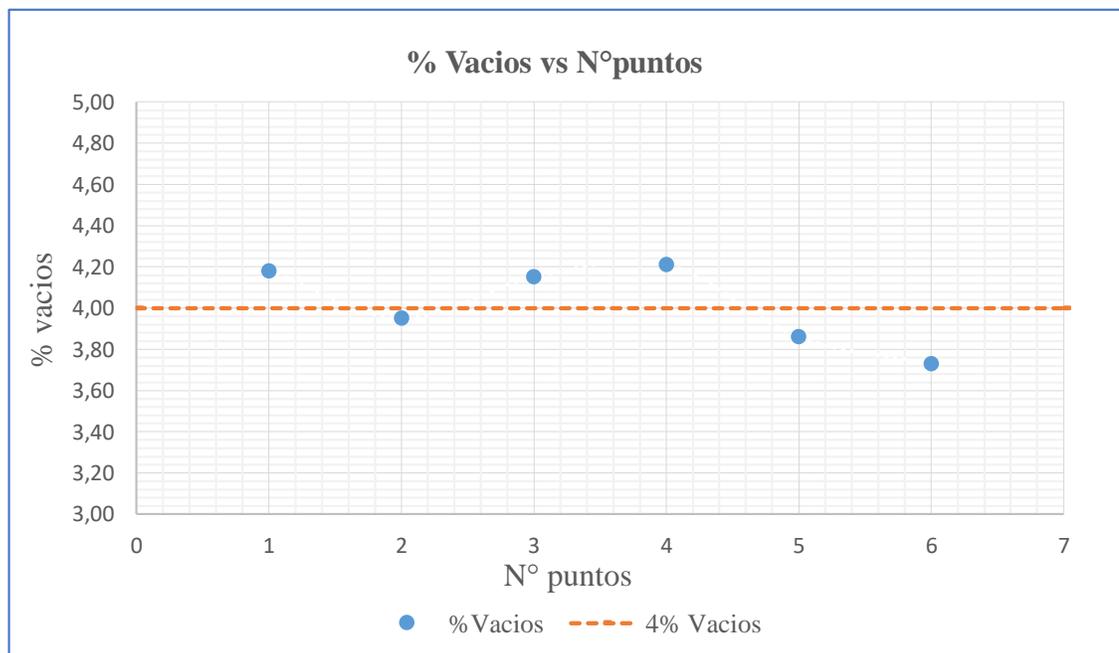
### Tramo N°3: avenida Felipe Palazón

Tabla 3.47: % de vacíos tramo avenida Felipe Palazón

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,18
	2	3,95
2	3	4,15
	4	4,21
3	5	3,86
	6	3,73
<b>Valor medio</b>		<b>4,01</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.79: % vacíos tramo avenida Felipe Palazón



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de la avenida Felipe Palazón se tiene un valor medio de 4,01 % de vacíos, lo cual se encuentra inferior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,21 % y mínimo 3,73 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,196, una variabilidad de 0,039 y un coeficiente de variación de 0,049.

Podemos observar que 3 de los valores se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 3 inferiores de lo establecido por diseño.

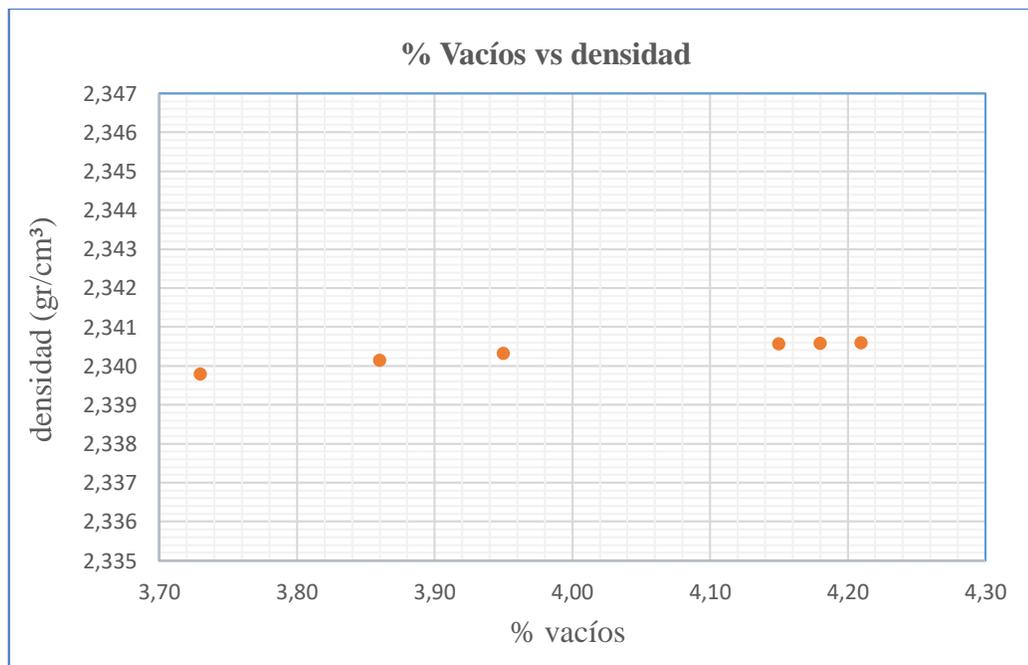
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (1) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída de la avenida Felipe Palazón.

Tabla 3.48: Densidad tramo avenida Felipe Palazón.

% vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,18	2,34058
3,95	2,34032
4,15	2,34056
4,21	2,34059
3,86	2,34013
3,73	2,33978

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.80: Densidad tramo avenida Felipe Palazón.



Fuente: Elaboración propia

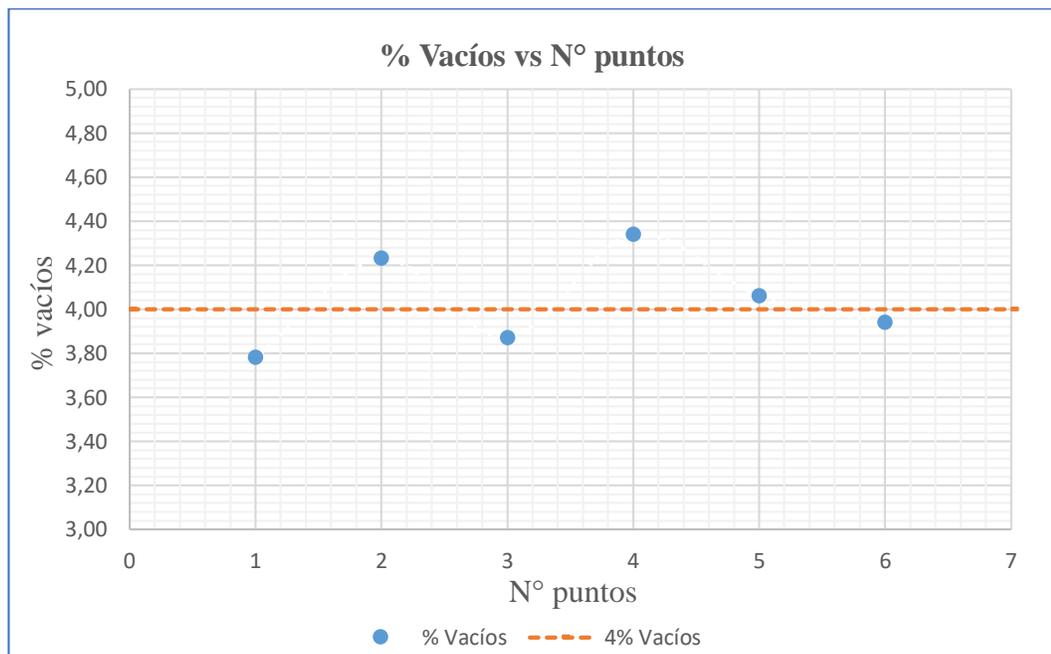
**Tramo N°4: calle Campero**

Tabla 3.49: % de vacíos tramo calle Campero

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	3,78
	2	4,23
2	3	3,87
	4	4,34
3	5	4,06
	6	3,94
<b>Valor medio</b>		<b>4,04</b>

Fuente:Elaboracion propia

Figura 3.81: % vacíos tramo calle Campero.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de la calle Campero se tiene un valor medio de 4,04 % de vacíos, lo cual se encuentra superior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,34 % y mínimo 3,78 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,216 con una variabilidad de 0,047 y un coeficiente de variación de 0,053.

De la figura 3.81 % de vacíos calle Campero podemos observar que 3 de los valores se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 3 inferiores de lo establecido por diseño.

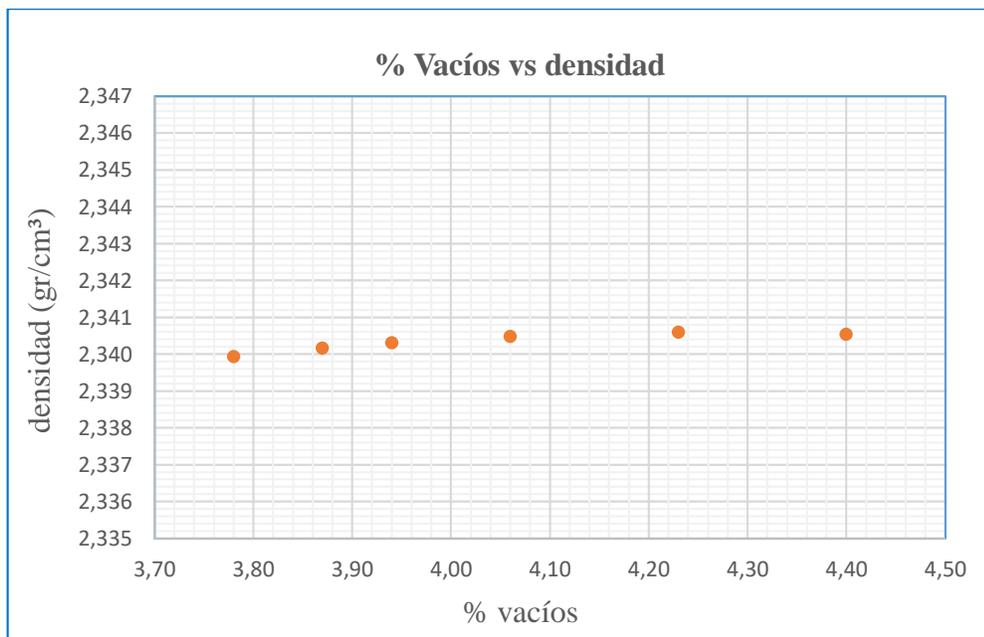
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (1) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída de la calle Campero.

Tabla 3.50: Densidad tramo calle Campero

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
3,78	2,33993
4,23	2,34059
3,87	2,34016
4,4	2,34054
4,06	2,34048
3,94	2,34030

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.82: % Densidad tramo calle Campero.



Fuente: Elaboración propia

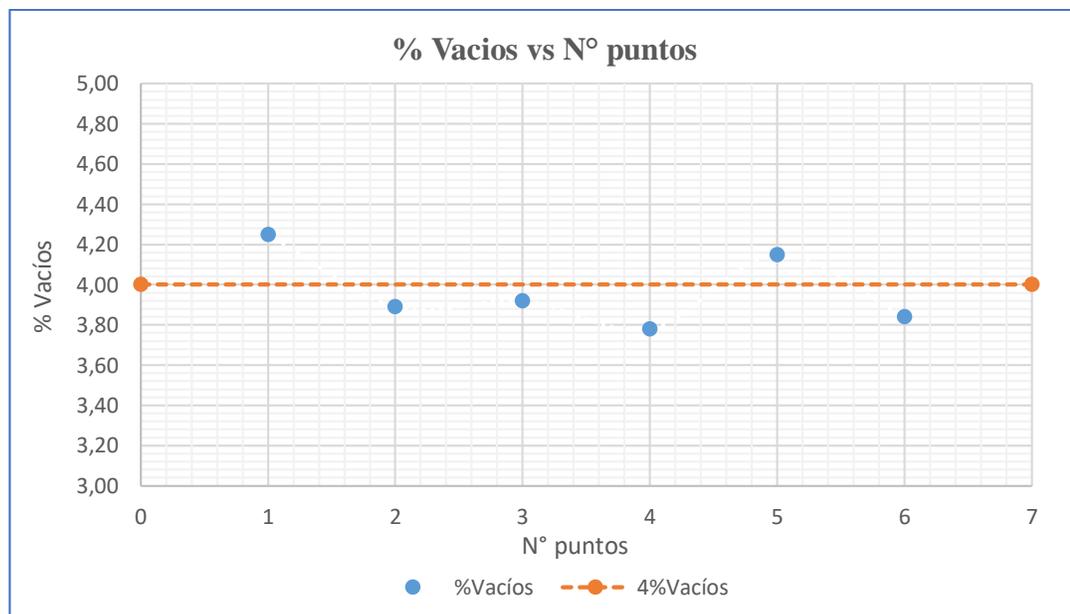
### Tramo N°5: calle Bolivar

Tabla 3.51: % de vacíos tramo calle Bolivar

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,25
	2	3,89
2	3	3,92
	4	3,78
3	5	4,15
	6	3,81
<b>Valor medio</b>		<b>3,97</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.83: % vacíos tramo calle Bolívar.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de la calle Bolívar se tiene un valor medio de 3,97% de vacíos, lo cual se encuentra inferior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,25 % y mínimo 3,78 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,190, una variabilidad de 0,036 y un coeficiente de variación de 0,048.

Podemos observar de la figura 3.83 que 2 de los datos se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 4 inferiores de lo establecido por diseño.

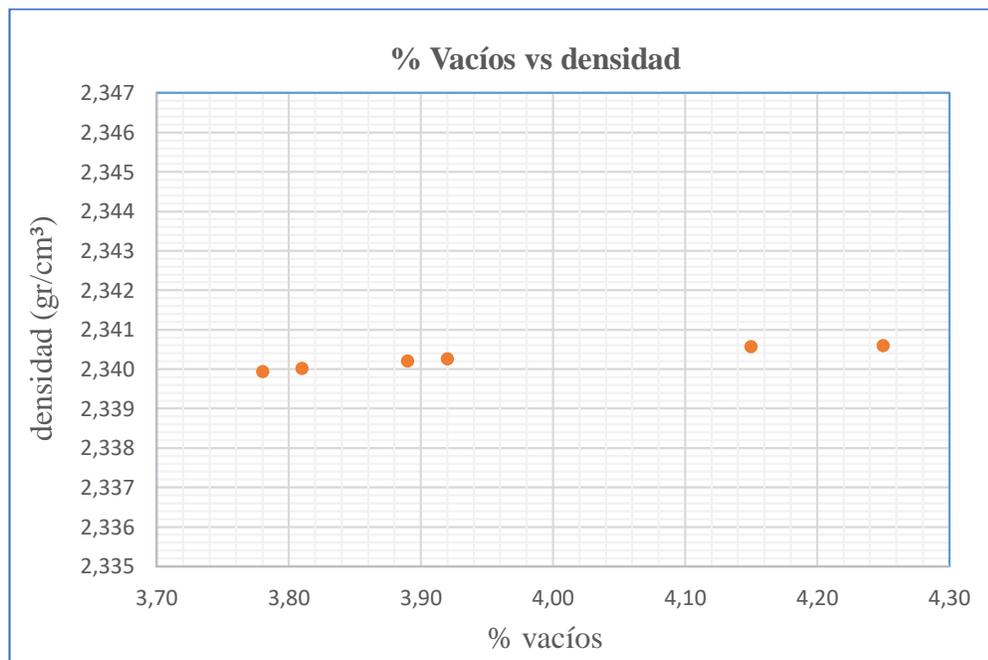
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (1) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída de la calle Bolívar.

Tabla 3.52: Densidad tramo calle Bolívar.

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,25	2,34059
3,89	2,34020
3,92	2,34026
3,78	2,33993
4,15	2,34056
3,81	2,34001

Fuente:Elaboracion propia

Figura 3.84: Densidad tramo calle Bolívar.



Fuente:Elaboracion propia

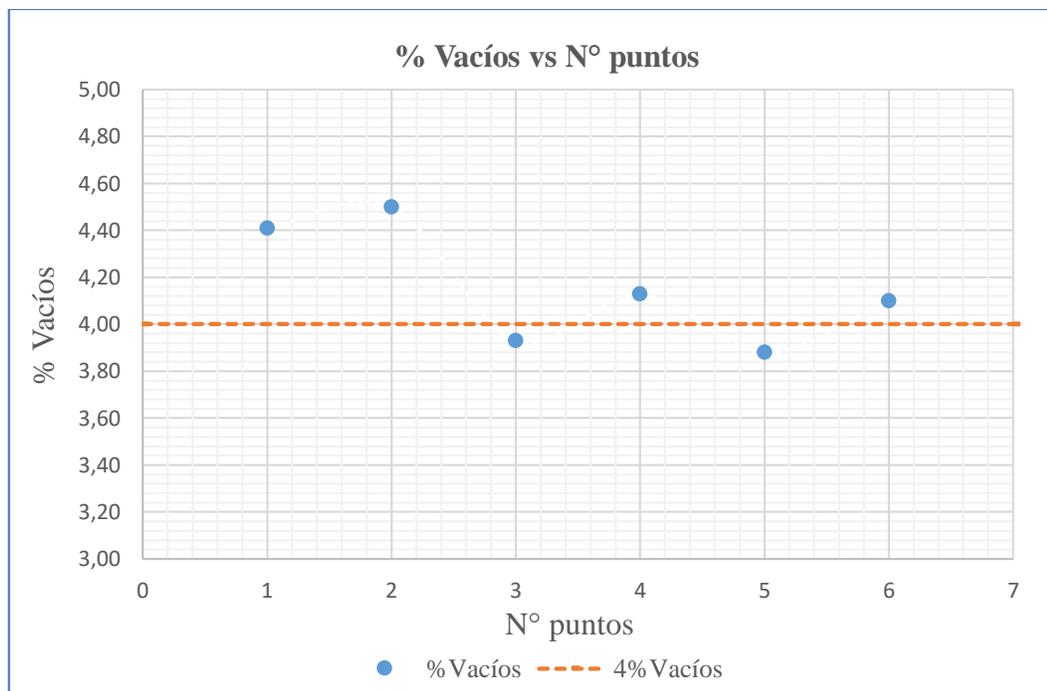
**Tramo N°6: calle O'connor**

Tabla 3.53: % de vacíos tramo calle O'connor.

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,41
	2	4,50
2	3	3,93
	4	4,13
3	5	3,88
	6	4,10
<b>Valor medio</b>		<b>4,16</b>

Fuente:Elaboracion propia

Figura 3.85: % vacíos tramo calle O'connor.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de la calle O'connor se tiene un valor medio de 4,16% de vacíos, lo cual se encuentra superior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,50 % y mínimo 3,88 % donde hay

una dispersión de los datos respecto a la media de 0,251, una variabilidad de 0,063 y un coeficiente de variación de 0,060.

Podemos observar que 4 de los datos se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 2 valores inferiores de lo establecido por diseño.

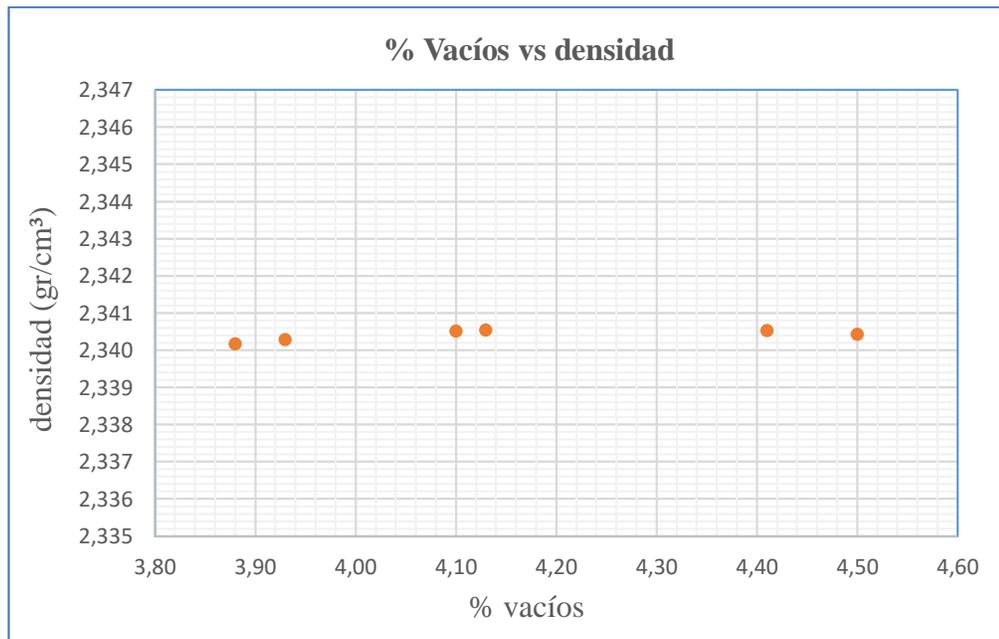
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (1) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída de la calle O'connor.

Tabla 3.54: Densidad tramo calle O'connor.

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,41	2,34053
4,50	2,34043
3,93	2,34028
4,13	2,34055
3,88	2,34018
4,10	2,34052

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.86: Densidad tramo calle O'connor.



Fuente: Elaboración propia

## Núcleos extraídos de tramos de SEDECA

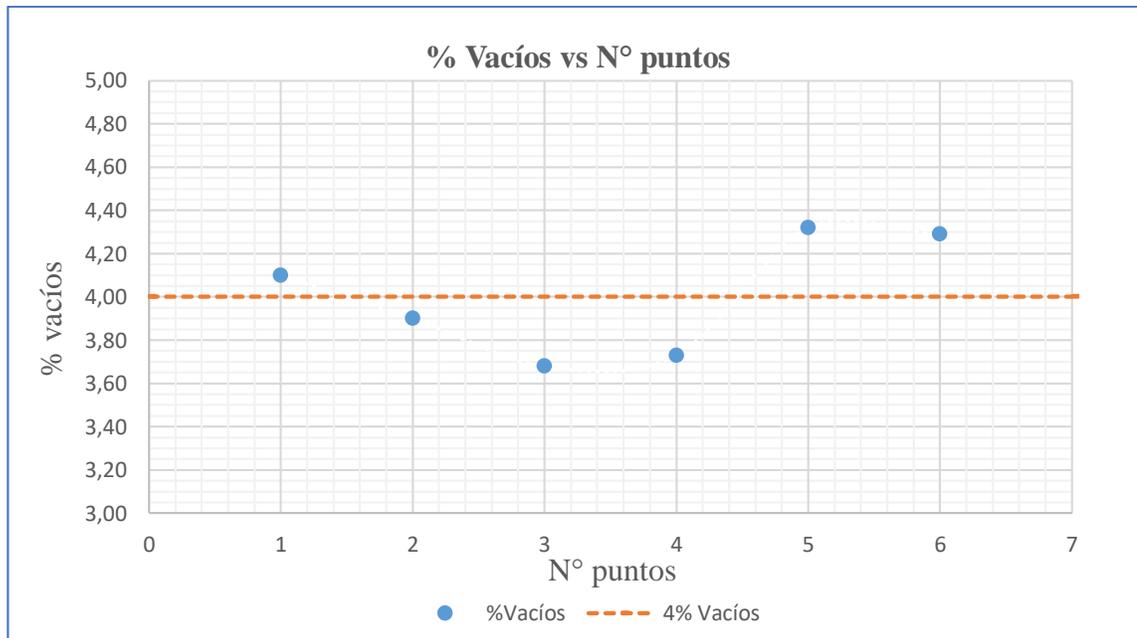
### Tramo N°1: Tarija - Puerta Chaco

Tabla 3.55: % de vacíos tramo Tarija - Puerta Chaco

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,10
	2	3,90
2	3	3,68
	4	3,73
3	5	4,32
	6	4,29
<b>Valor medio</b>		<b>4,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.87: % vacíos tramo Tarija - Puerta Chaco



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de tramo Tarija - Puerta Chaco se tiene un valor medio de 4,00 % de vacíos, lo cual se encuentra inferior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,32 % y mínimo 3,68 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,276, una variabilidad de 0,076 y un coeficiente de variación de 0,069.

Podemos observar que 3 de los datos se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 3 valores inferiores de lo establecido por diseño.

De la relación de densidad y porcentaje de vacíos obtenida por método Marshall, es decir con la ecuación (3) obtenemos la densidad de la mezcla.

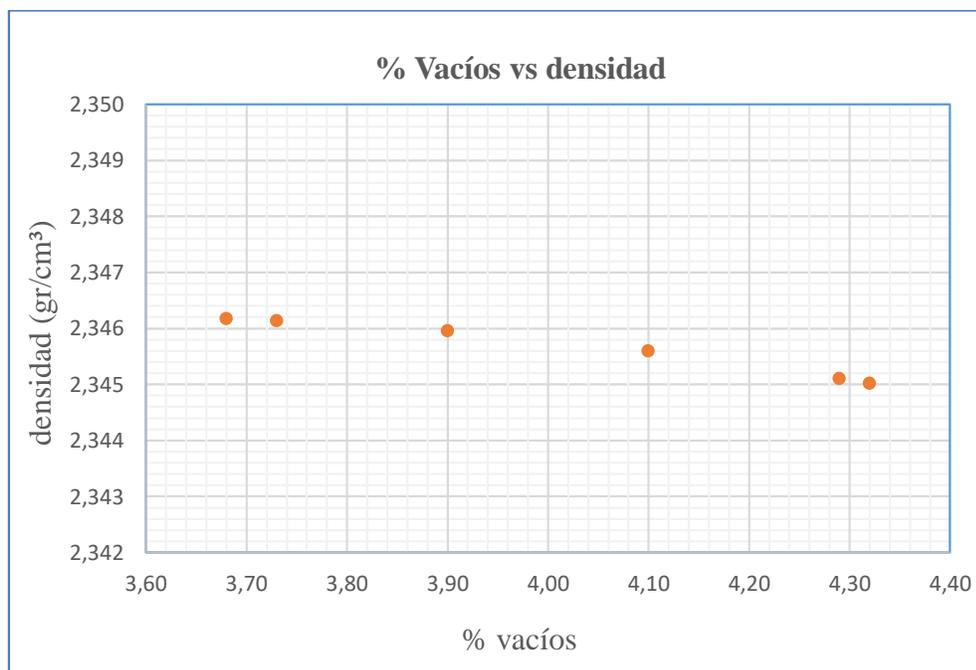
Entonces la densidad de la mezcla extraída del tramo Tarija - Puerta Chaco es:

Tabla 3.56: Densidad tramo Tarija - Puerta Chaco.

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,10	2,34560
3,90	2,34596
3,68	2,34617
3,73	2,34614
4,32	2,34502
4,29	2,34511

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.88: Densidad tramo Tarija - Puerta Chaco



Fuente: Elaboración propia

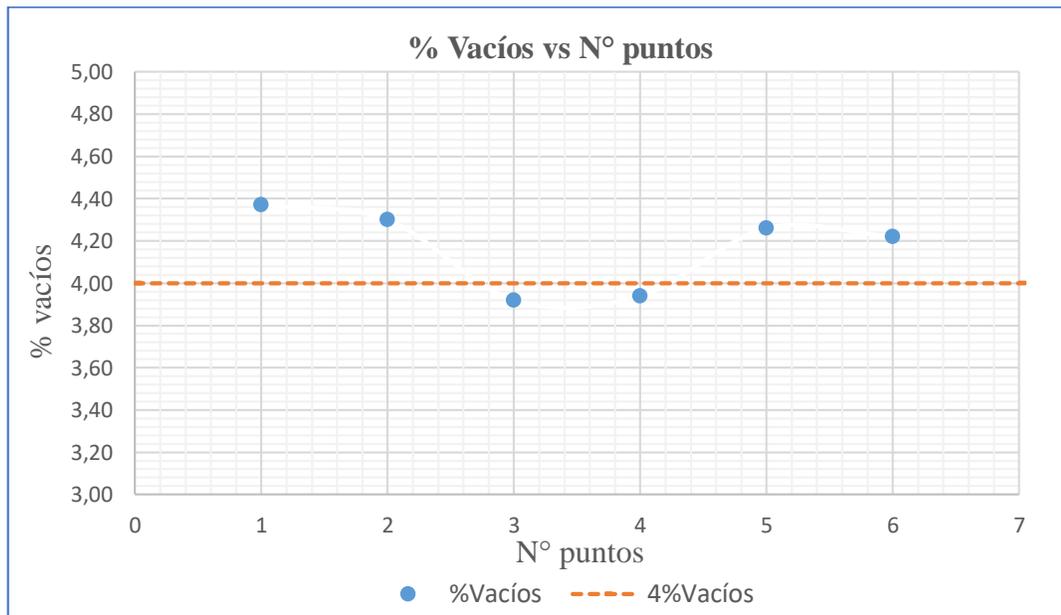
**Tramo N°2: Puerta Chaco - Puente Jarcas**

Tabla 3.57: % de vacíos tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas.

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,37
	2	4,30
2	3	3,92
	4	3,94
3	5	4,26
	6	4,22
<b>valor medio</b>		<b>4,17</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.89: % vacíos tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas se tiene un valor medio de 4,17 % de vacíos, lo cual se encuentra superior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,37 % y mínimo 3,92 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,191, una variabilidad de 0,037 y un coeficiente de variación de 0,046.

Podemos observar de la figura 3.89 que 3 de los valores se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 3 valores inferiores de lo establecido por diseño.

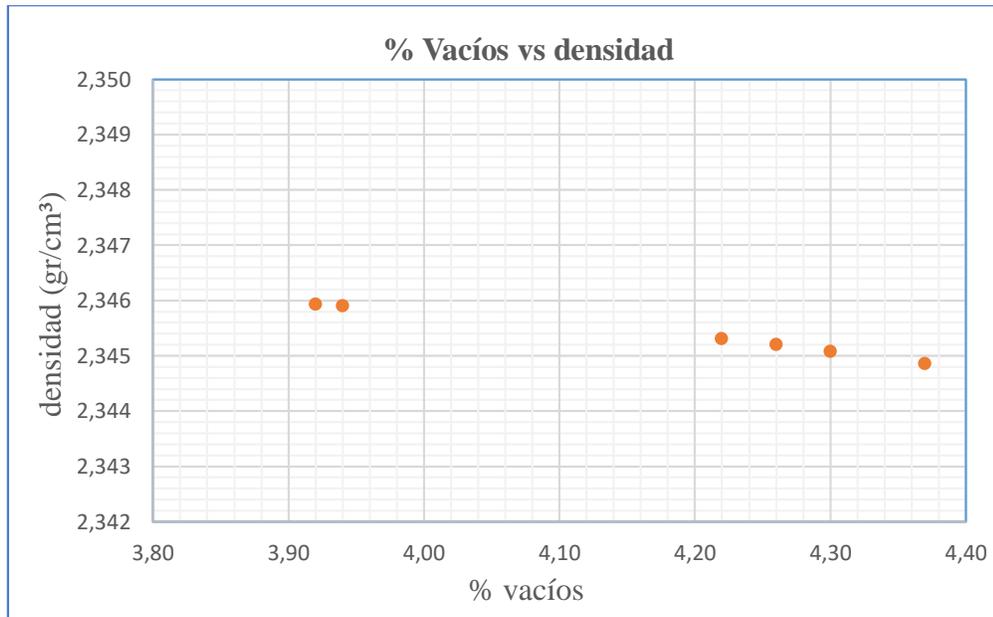
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (3) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída del tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas.

Tabla 3.58: Densidad tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas.

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,37	2,34486
4,30	2,34508
3,92	2,34593
3,94	2,34590
4,26	2,34520
4,22	2,34531

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.90: Densidad tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas.



Fuente: Elaboración propia

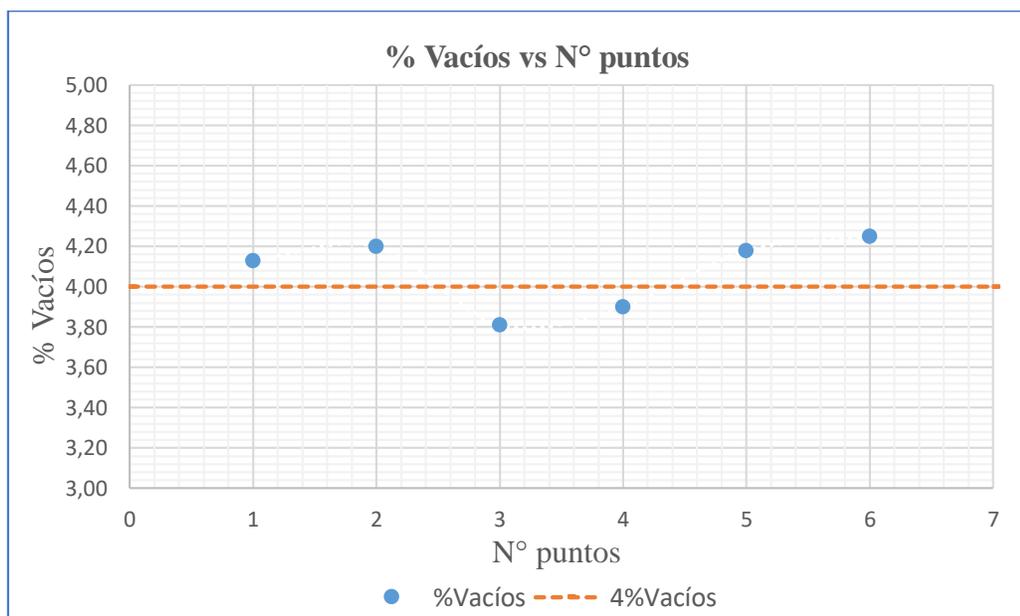
### Tramo N°3: Puente Jarcas - Piedra Larga.

Tabla 3.59: % de vacíos tramo Puente Jarcas - Piedra Larga.

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,13
	2	4,20
2	3	3,81
	4	3,90
3	5	4,18
	6	4,25
<b>Valor medio</b>		<b>4,08</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.91: % vacíos tramo Puente Jarcas - Piedra Larga.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de tramo Puente Jarcas - Piedra Larga se tiene un valor medio de 4,08 % de vacíos, lo cual se encuentra superior al valor del diseño de 4 % de vacíos; el valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,36 % y mínimo 3,81 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,179, una variabilidad de 0,032 y un coeficiente de variación de 0,044.

Podemos observar que 4 de los datos se encuentran superiores al 4 % de vacíos y los otros 2 valores inferiores de lo establecido por diseño.

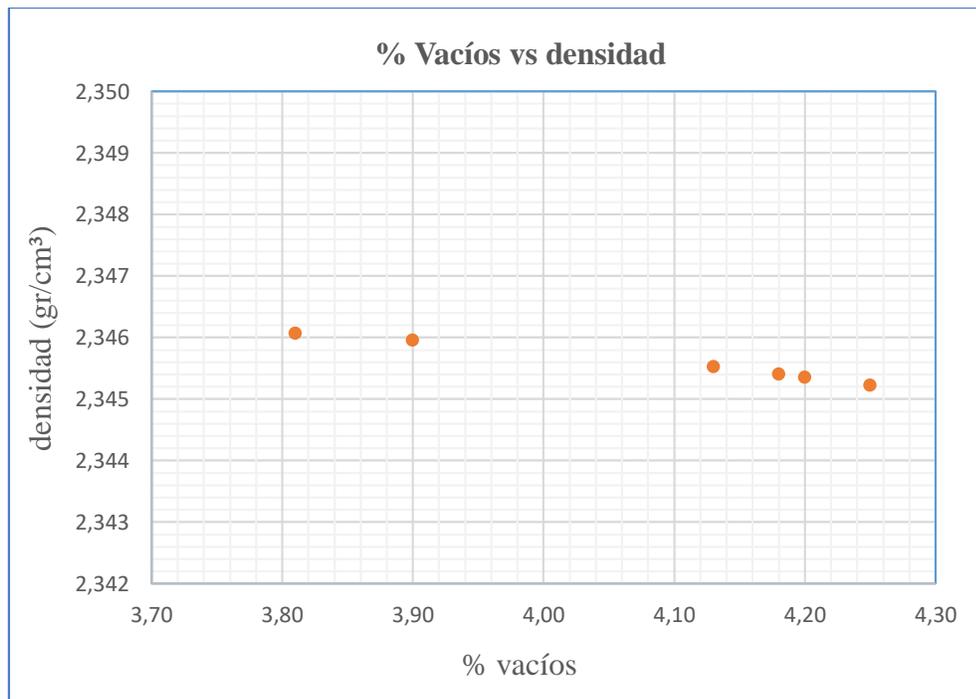
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (3) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída del tramo Puente Jarcas – Piedra Larga.

Tabla 3.60: % de vacíos tramo Puente Jarcas - Piedra Larga.

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,13	2,34553
4,20	2,34536
3,81	2,34607
3,90	2,34596
4,18	2,34541
4,25	2,34523

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.92: Densidad tramo Puente Jarcas - Piedra Larga.



Fuente: Elaboración propia

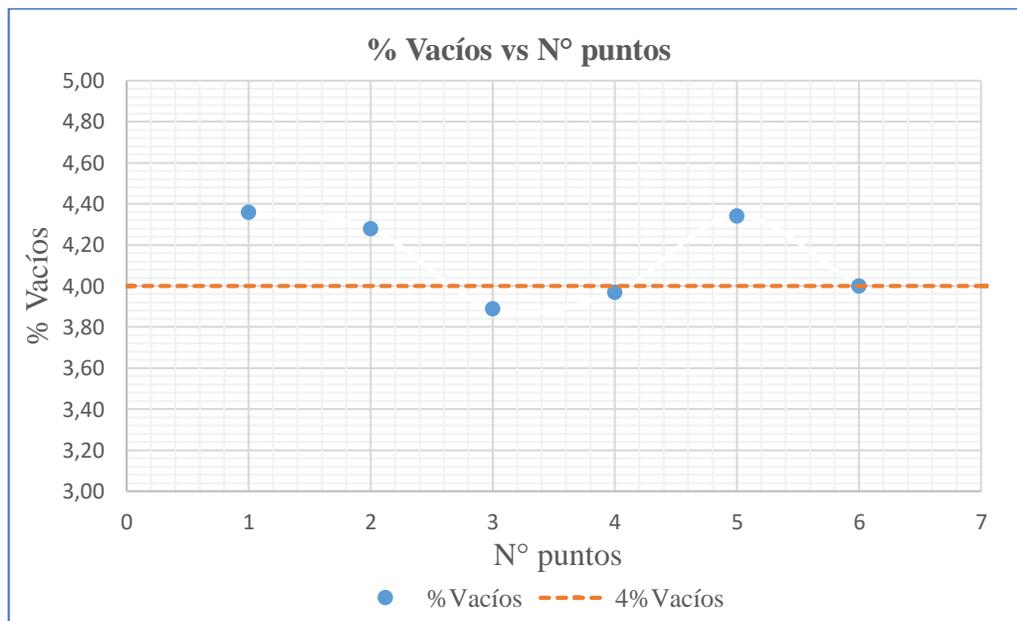
#### Tramo N°4: Piedra Larga - Canaletas

Tabla 3.61: % de vacíos tramo Piedra Larga - Canaletas.

N° de núcleo	Imágenes transversales	% Vacíos
1	1	4,36
	2	4,28
2	3	3,89
	4	3,97
3	5	4,34
	6	4,00
<b>Valor medio</b>		<b>4,14</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.93: % vacíos tramo Piedra Larga - Canaletas.



Fuente: Elaboración propia

Del análisis de esta muestra obtenida de tramo Piedra Larga - Canaletas se tiene un valor medio de 4,14 % de vacíos, lo cual se encuentra superior al valor del diseño de 4 % de vacíos.

El valor máximo de vacíos en esta mezcla asfáltica es 4,36 % y mínimo 3,89 % donde hay una dispersión de los datos respecto a la media de 0,209, una variabilidad de 0,044 y un coeficiente de variación de 0,051.

Podemos observar que 3 de los datos se encuentran superiores al 4 % de vacíos y un valor igual al 4 % y 2 valores inferiores de lo establecido por diseño.

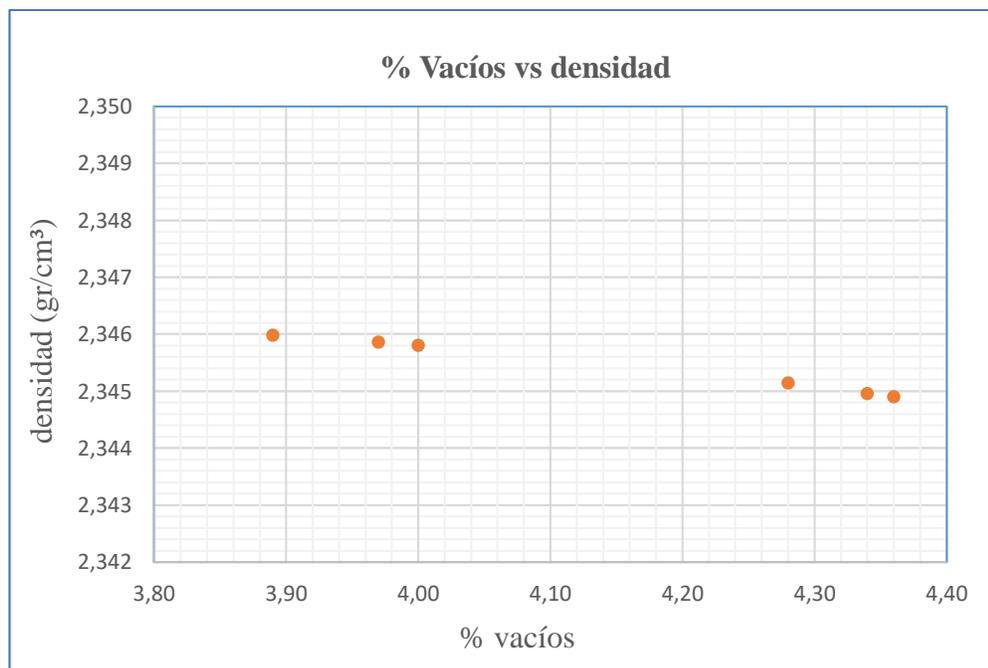
Con los datos de porcentaje de vacíos obtenidos a través de las imágenes digitales con la ecuación (3) obtenemos la densidad de la mezcla asfáltica extraída del tramo Piedra Larga - Canaletas.

Tabla 3.62: % Densidad tramo Piedra Larga - Canaletas.

% Vacíos	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
4,36	2,34489
4,28	2,34514
3,89	2,34597
3,97	2,34585
4,34	2,34496
4,00	2,34580

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.94: Densidad tramo Piedra Larga - Canaletas.



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2.2. Analisis del contacto agregado - agregado

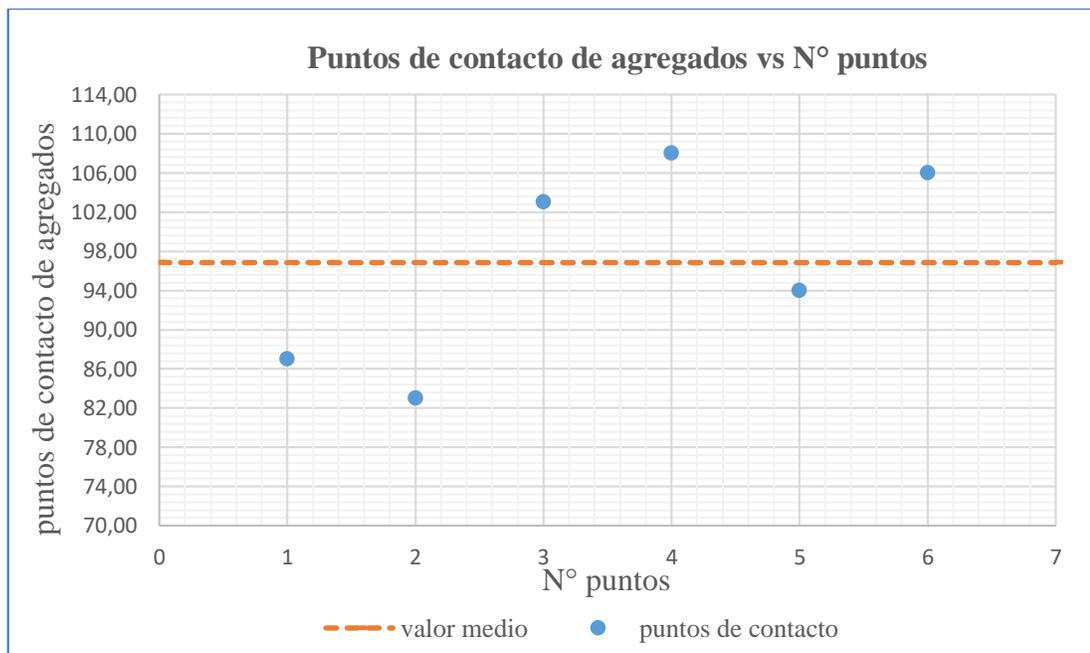
#### Tramo N°1: avenida Triple Vía

Tabla 3.63: Contacto agregado - agregado tramo avenida Triple Vía.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	87,00
	2	83,00
2	3	103,00
	4	108,00
3	5	94,00
	6	106,00
<b>Valor medio</b>		<b>97,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.95: Contacto agregado - agregado tramo avenida Triple Vía.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras de la avenida Triple Vía donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 97, se presenta un valor máximo 108 y un mínimo 83 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 10,420, una variabilidad de 108,567 y un coeficiente de variación de 0,108; donde tenemos 3 datos superiores al valor medio y 3 datos inferiores.

Después de encontrar los puntos de contacto agregado – agregado que presenta la mezcla, por medio de la ecuación (2) representada por la relación de número de contactos de agregados obtenido a través de las imágenes digitales y estabilidad obtenida de método Marshall, se encontrará la estabilidad de la mezcla extraída.

Usando la ecuación:

$$y = 77,409x - 2762,50$$

Donde:

y = Estabilidad (Lb)

x = puntos de contacto de agregados

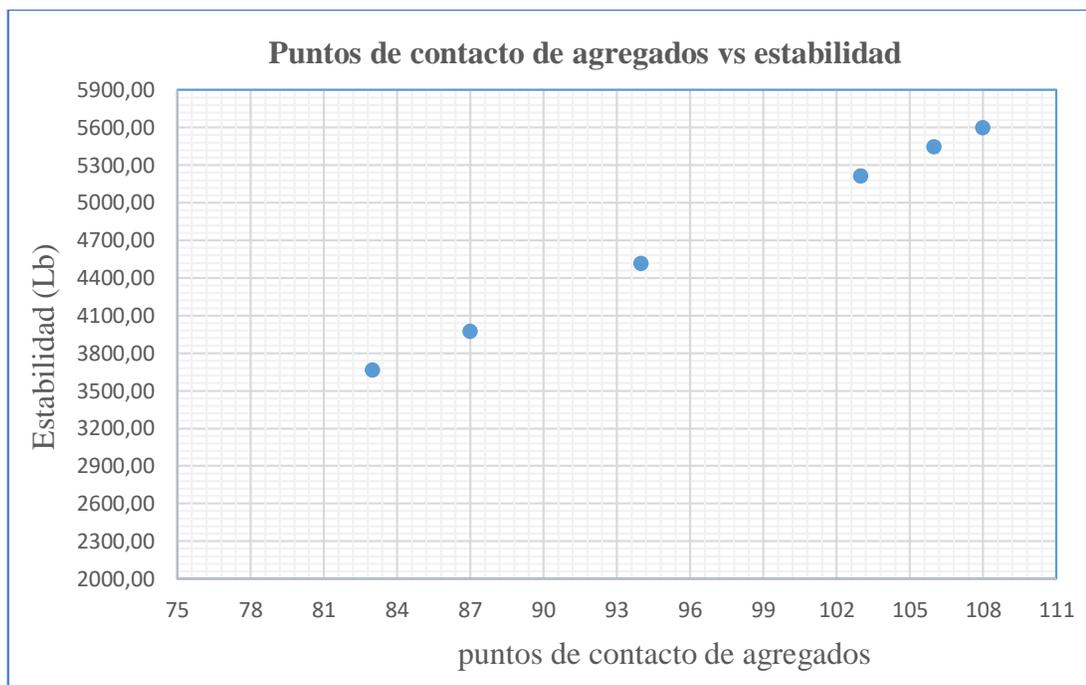
Por lo tanto, la estabilidad de la mezcla del tramo de la avenida Triple Vía es:

Tabla 3.64: Estabilidad tramo avenida Triple Vía.

Puntos de contacto agregados (TC)	Estabilidad (Libras)
87,00	3972,083
83,00	3662,447
103,00	5210,627
108,00	5597,672
94,00	4513,946
106,00	5442,854

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.96: Estabilidad tramo avenida Triple Vía.



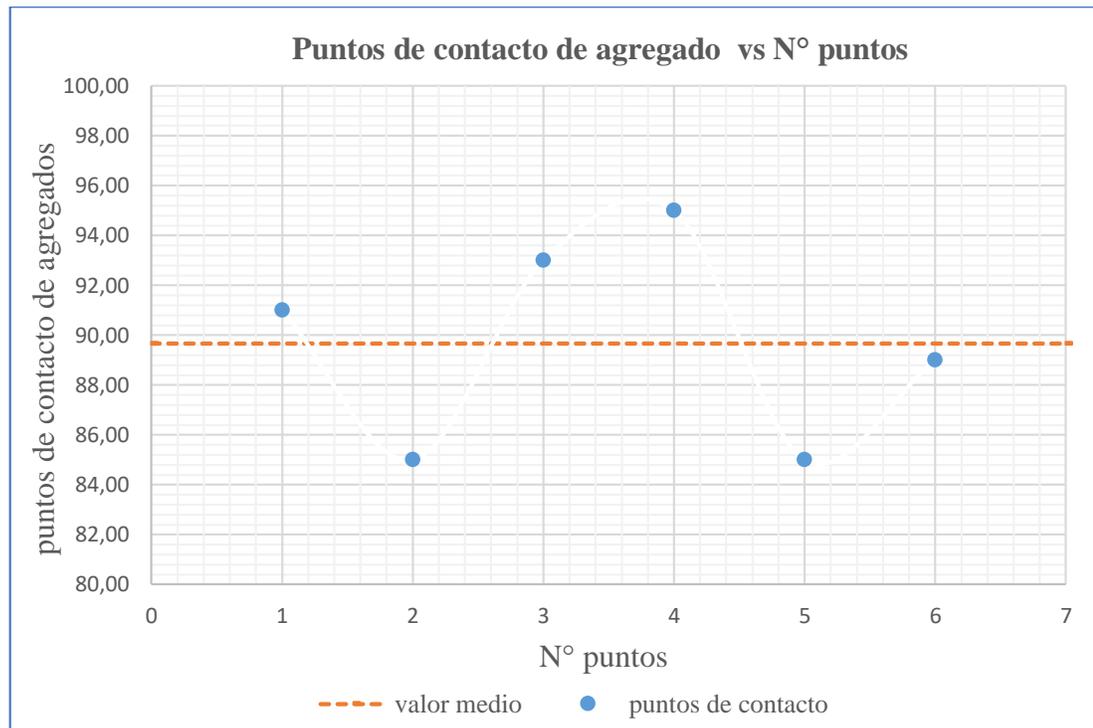
**Tramo N°2: calle Delio Echazú**

Tabla 3.65: Contacto agregado - agregado tramo calle Delio Echazú.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	91,00
	2	85,00
2	3	93,00
	4	95,00
3	5	85,00
	6	89,00
<b>Valor medio</b>		<b>90,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.97: Contacto agregado - agregado tramo calle Delio Echazú.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras de la calle Delio Echazú donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 90, se presenta un valor máximo 98 y un mínimo 86 puntos de contacto.

Las muestras extraídas presentan una desviación estándar de 4,131, una variabilidad de 17,067 y un coeficiente de variación de 0,046; donde tenemos 3 datos superiores al valor medio y 3 datos inferiores.

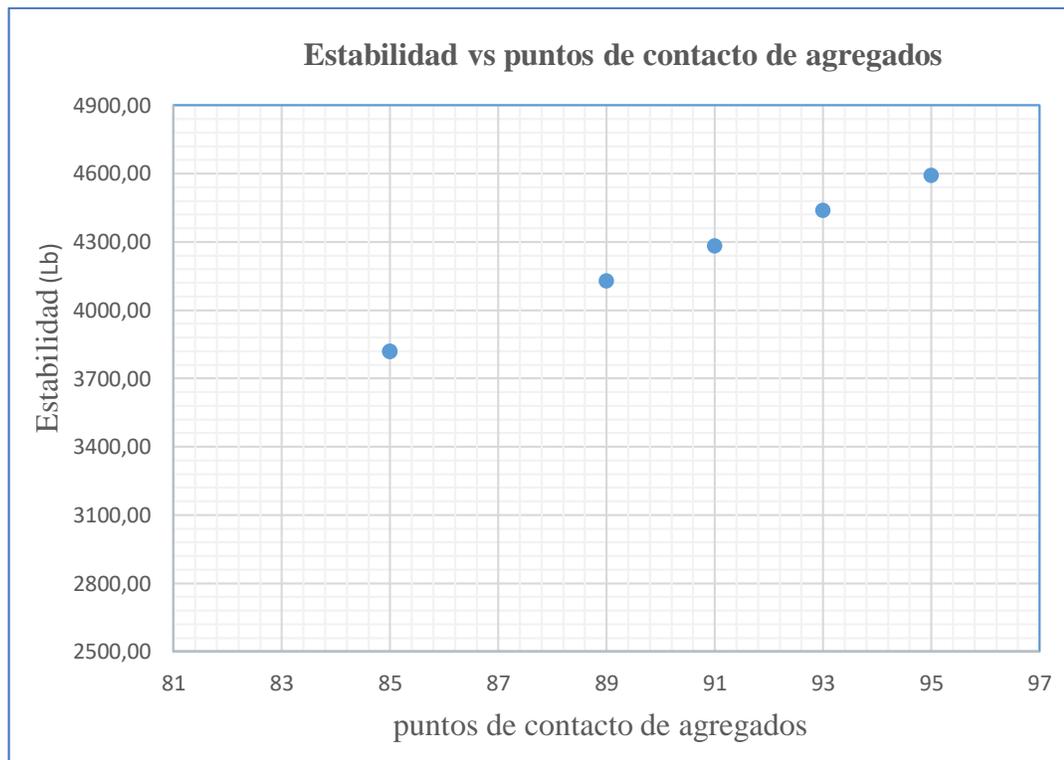
A partir de la ecuación (2) con el número de puntos de contacto de agregados encontrados por tomografía computarizada la estabilidad del tramo de la calle Delio Echazú es:

Tabla 3.66: Estabilidad del tramo calle Delio Echazú.

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
91,00	4281,719
85,00	3817,265
93,00	4436,537
95,00	4591,355
85,00	3817,265
89,00	4126,901

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.98: Estabilidad tramo calle Delio Echazú.



Fuente: Elaboración propia

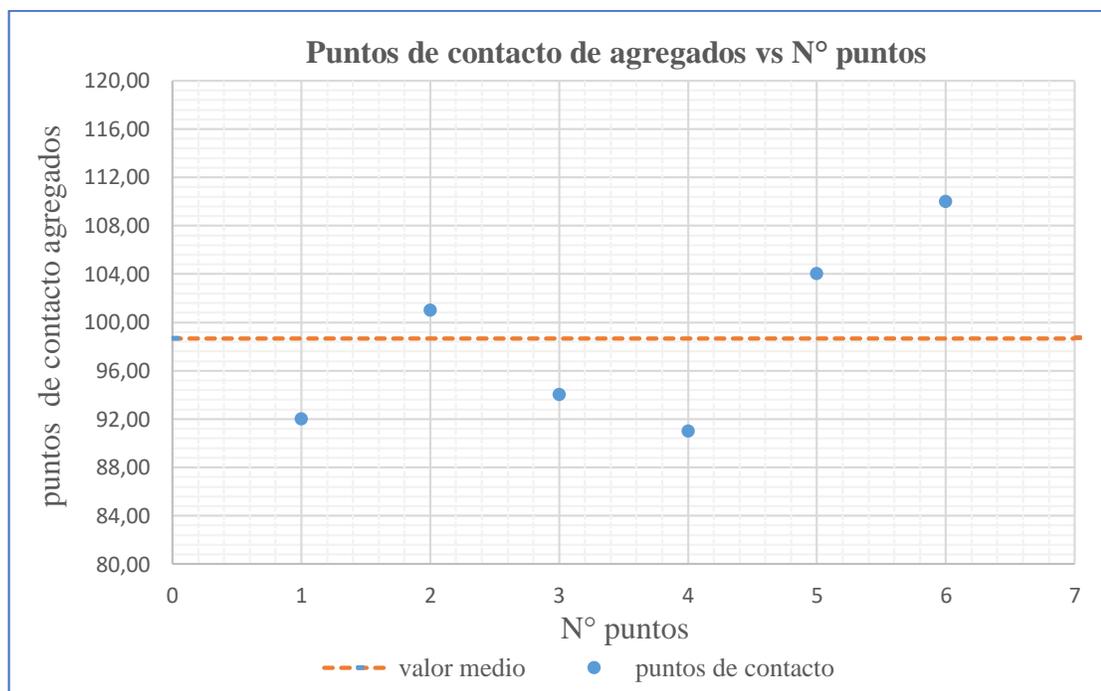
### Tramo N°3: avenida Felipe Palazón

Tabla 3.67: Contacto agregado - agregado tramo avenida Felipe Palazón.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	92,00
	2	101,00
2	3	94,00
	4	91,00
3	5	104,00
	6	110,00
<b>Valor medio</b>		<b>99,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.99: Contacto agregado - agregado tramo avenida Felipe Palazón.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras de la avenida Felipe Palazón donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 99, se presenta un valor máximo 100 y un mínimo 91 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 7,581, una variabilidad de 57,467 y un coeficiente de variación de 0,077; donde tenemos 3 datos superiores al valor medio, 3 datos inferiores al valor medio.

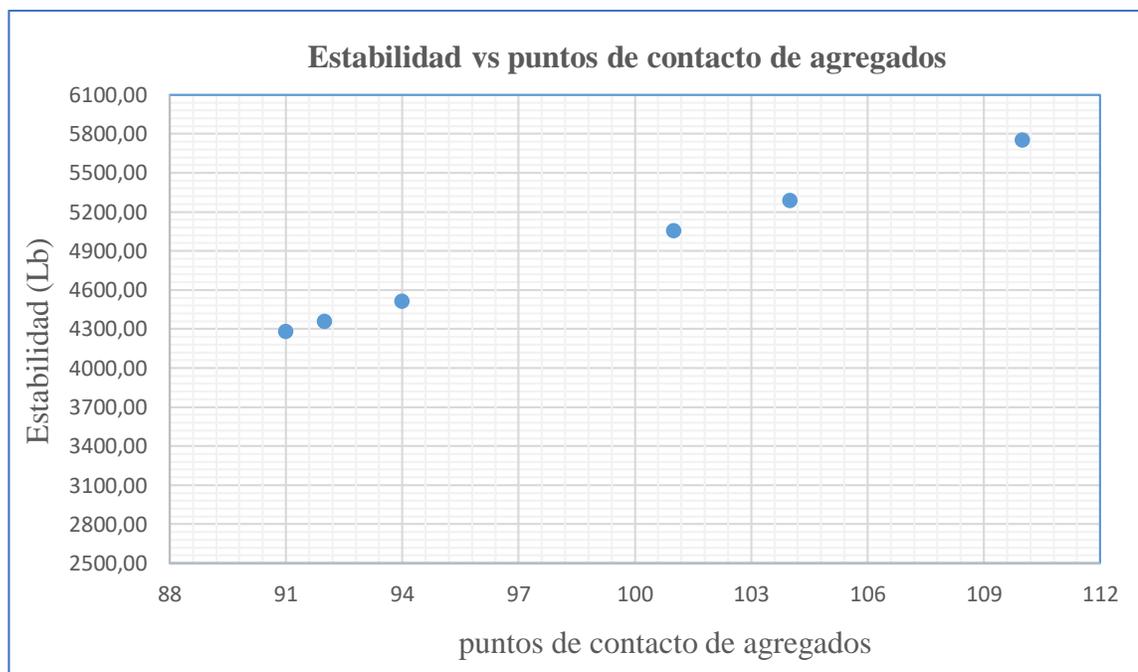
A partir de la ecuación 2 con el número de puntos de contacto de agregados encontrados de las imágenes digitales la estabilidad del tramo de la avenida Felipe Palazón es:

Tabla 3.68: Estabilidad del tramo avenida Felipe Palazón.

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
92,00	4359,128
101,00	5055,809
94,00	4513,946
91,00	4281,719
104,00	5288,036
110,00	5752,49

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.100: Estabilidad del tramo avenida Felipe Palazón.



Fuente: Elaboración propia

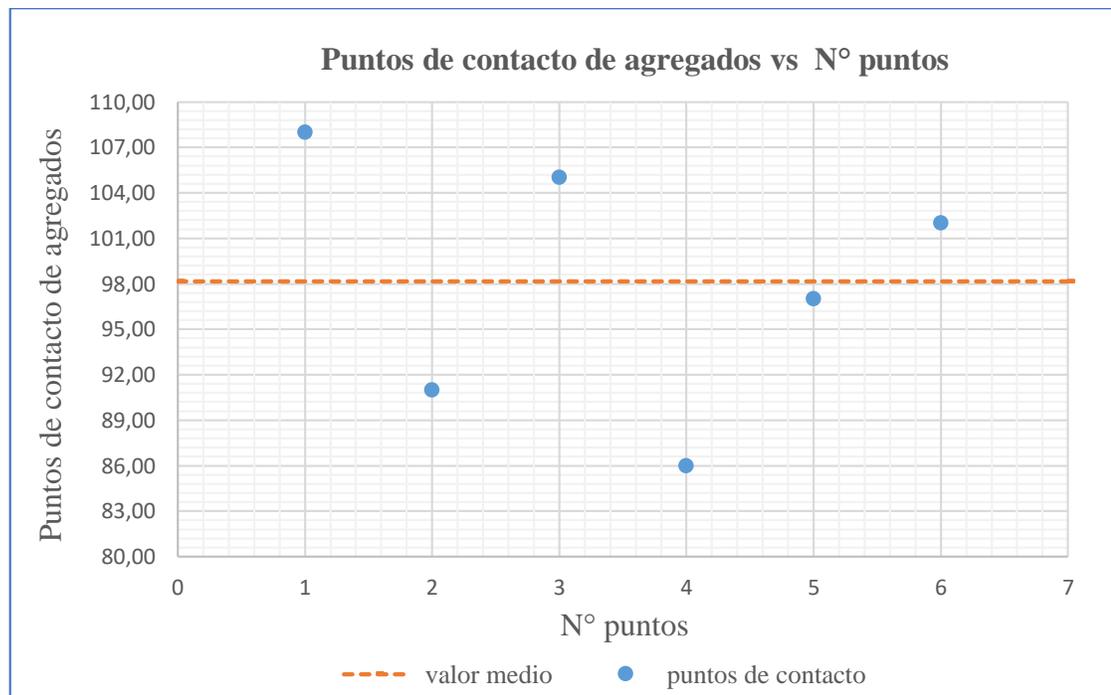
#### Tramo N°4: calle Campero

Tabla 3.69 Contacto agregado - agregado tramo calle Campero.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	108,00
	2	91,00
2	3	105,00
	4	86,00
3	5	97,00
	6	102,00
<b>Valor medio</b>		<b>98,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.101: Contacto agregado - agregado tramo calle Campero.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras de la calle Campero donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 98, se presenta un valor máximo 108 y un mínimo 86 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 8,472, una variabilidad de 71,767 y un coeficiente de variación de 0,086; donde tenemos 3 datos superiores y 3 datos inferiores al valor medio.

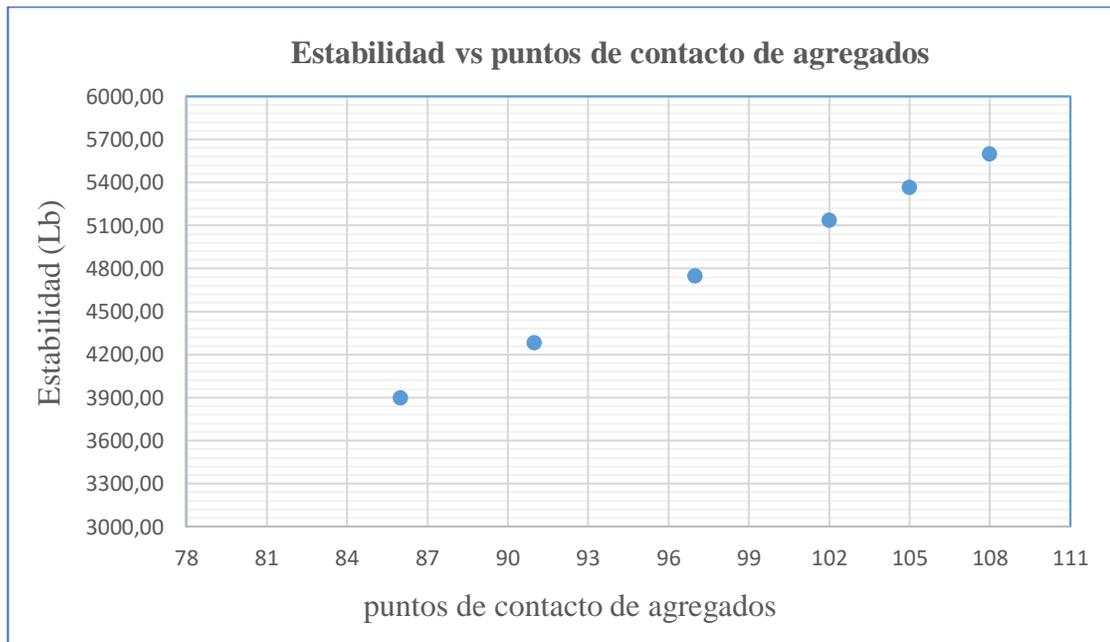
A partir de la ecuación 2 con el número de puntos de contacto de agregados encontrados de las imágenes digitales la estabilidad del tramo de la calle Campero es:

Tabla 3.70 Estabilidad del tramo calle Campero.

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
108,00	5597,672
91,00	4281,719
105,00	5365,445
86,00	3894,674
97,00	4746,173
102,00	5133,218

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.102: Estabilidad tramo calle Campero.



Fuente: Elaboración propia

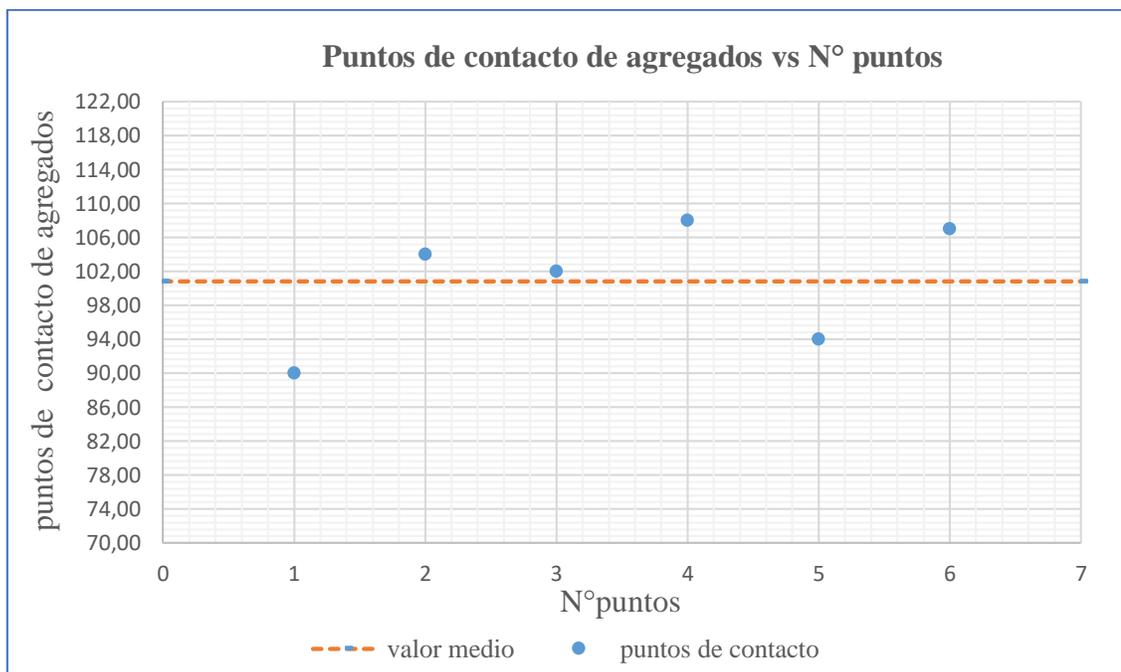
**Tramo N°5: calle Bolívar**

Tabla 3.71: Contacto agregado - agregado tramo calle Bolívar.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	90,00
	2	104,00
2	3	102,00
	4	108,00
3	5	94,00
	6	107,00
<b>valor medio</b>		<b>101,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.103: Contacto agregado - agregado tramo calle Bolívar.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras de la calle Bolívar donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 101, se presenta un valor máximo 108 y un mínimo 90 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 7,278, una variabilidad de 52,967 y un coeficiente de variación de 0,072; donde tenemos 4 datos superiores y 2 datos inferiores al valor medio.

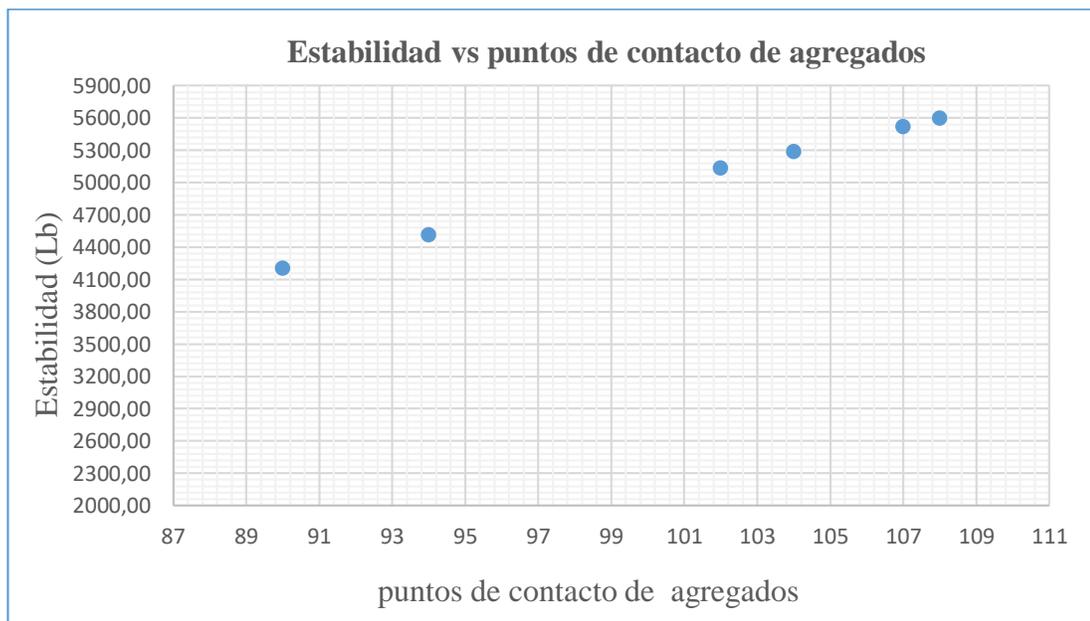
A partir de la ecuación 2 con el número de puntos de contacto de agregados encontrados de las imágenes digitales la estabilidad del tramo de la calle Bolívar es:

Tabla 3.72: Estabilidad tramo calle Bolívar.

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
90,00	4204,310
104,00	5288,036
102,00	5133,218
108,00	5597,672
94,00	4513,946
107,00	5520,263

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.104: Estabilidad tramo calle Bolívar.



Fuente: Elaboración propia

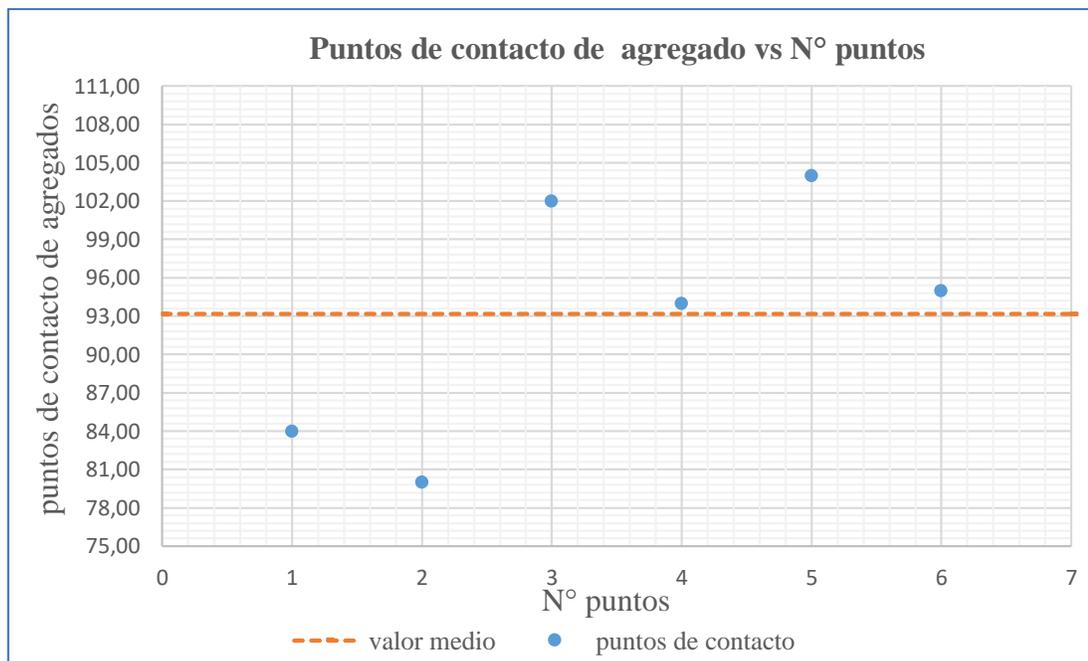
### Tramo N°6: calle O'connor

Tabla 3.73: Contacto agregado - agregado tramo calle O'connor.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	84,00
	2	80,00
2	3	102,00
	4	94,00
3	5	104,00
	6	95,00
<b>Valor medio</b>		<b>93,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.105: Contacto agregado - agregado tramo calle O'connor.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras de la calle O'connor donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 93, se presenta un valor máximo 104 y un mínimo 80 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 9,559, una variabilidad de 91,367 y un coeficiente de variación de 0,103; donde tenemos 4 datos superiores y 2 datos inferiores al valor medio.

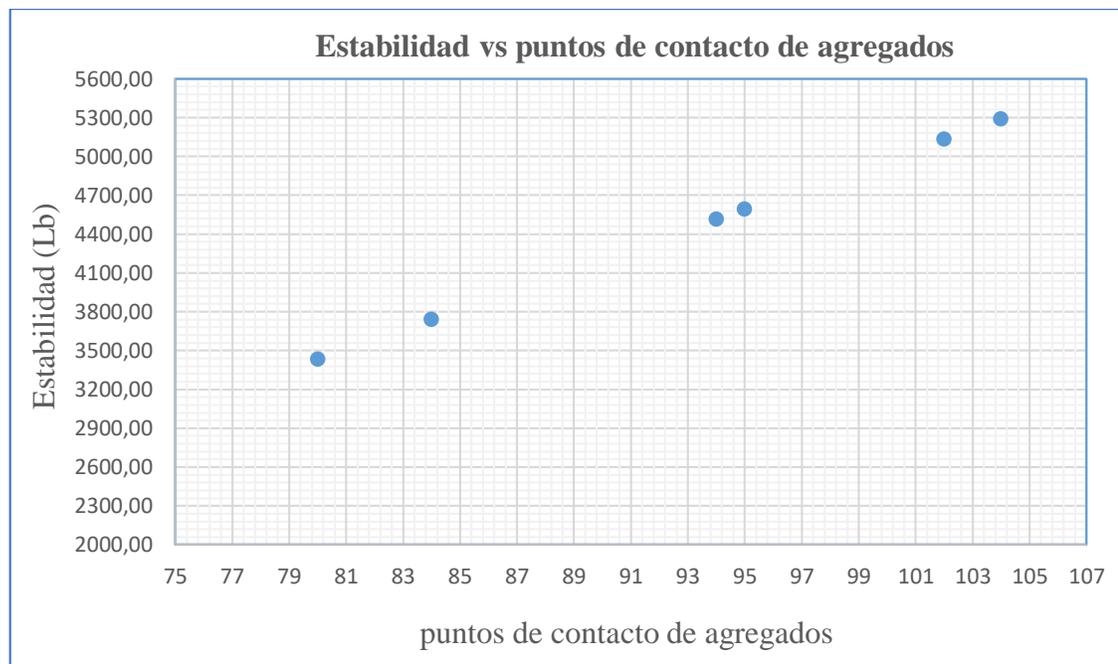
A partir de la ecuación 2 con el número de puntos de contacto de agregados encontrados de las imágenes digitales la estabilidad del tramo de la calle O'connor es:

Tabla 3.74: Contacto agregado - agregado tramo calle O'connor.

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
84,00	3739,856
80,00	3430,22
102,00	5133,218
94,00	4513,946
104,00	5288,036
95,00	4591,355

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.106: Estabilidad tramo Calle O'connor.



Fuente: Elaboración propia

## Núcleos extraídos de tramos de SEDECA

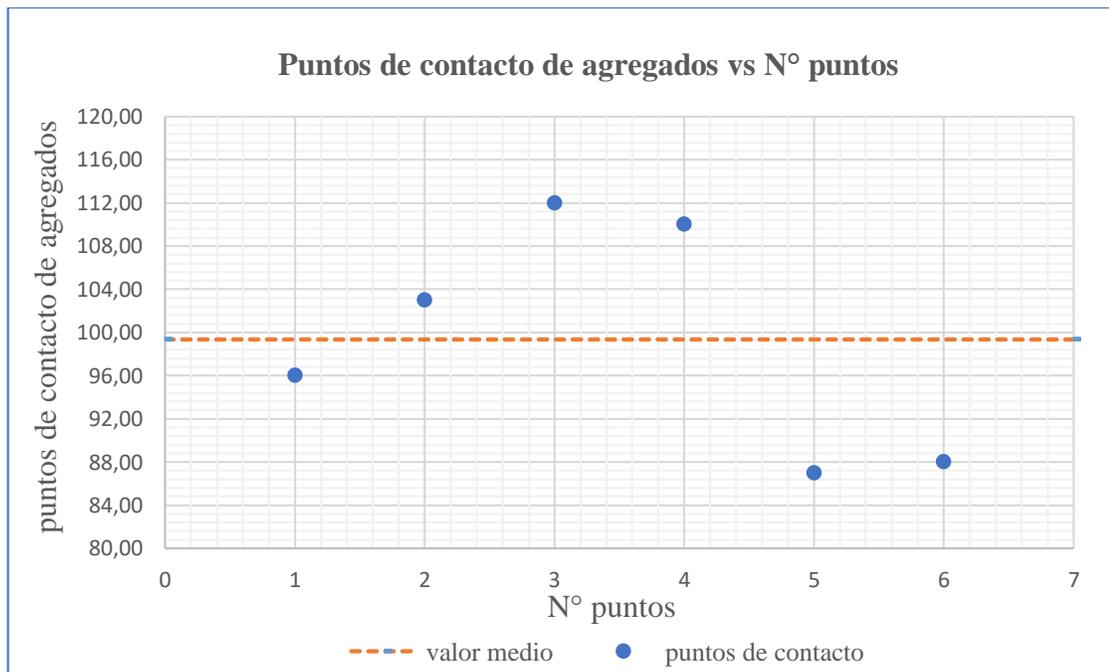
### Tramo N°1: Tarija - Puerta Chaco

Tabla 3.75: Contacto agregado - agregado tramo Tarija - Puerta Chaco.

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	96,00
	2	103,00
2	3	112,00
	4	110,00
3	5	87,00
	6	88,00
<b>Valor medio</b>		<b>99,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.107: Contacto agregado - agregado tramo Tarija - Puerta Chaco.



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras del tramo Tarija - Puerta Chaco donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 99, se presenta un valor máximo 112 y un mínimo 87 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 10,764, una variabilidad de 115,867 y un coeficiente de variación de 0,108; donde tenemos 3 datos superiores y 3 datos inferiores al valor medio.

De la relación de número de contactos de agregados obtenido a través de las imágenes digitales y estabilidad obtenida de método Marshall, mediante la ecuación (4) se obtiene de los núcleos extraídos la estabilidad de la mezcla.

Usando la ecuación:

$$y = 67,678x - 2460,80$$

Donde:

y = Estabilidad (Lb)

x = N° de contacto de agregados

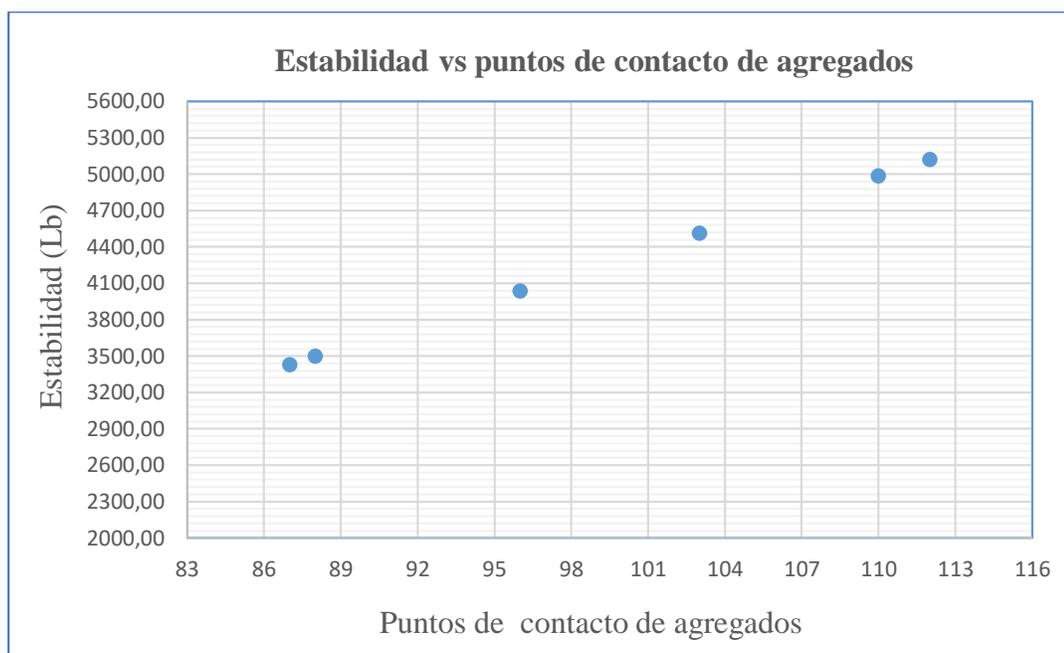
Por lo tanto, la estabilidad de la mezcla del tramo Tarija - Puerta Chaco es:

Tabla 3.76: Contacto agregado - agregado tramo Tarija - Puerta Chaco.

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
96,00	4036,288
103,00	4510,034
112,00	5119,136
110,00	4983,780
87,00	3427,186
88,00	3494,864

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.108: Estabilidad del tramo Tarija - Puerta Chaco.



Fuente: Elaboración propia

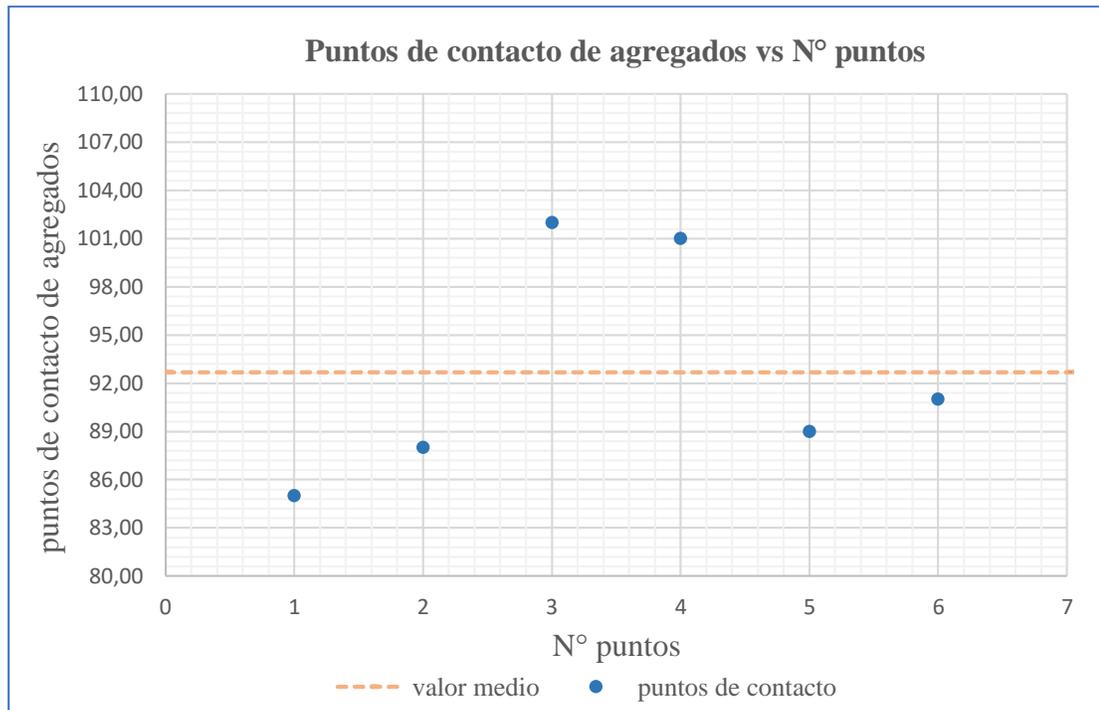
### Tramo N°2: Puerta Chaco - Puente Jarcas

Tabla 3.77: Contacto agregado - agregado tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	85,00
	2	88,00
2	3	102,00
	4	101,00
3	5	89,00
	6	91,00
<b>Valor medio</b>		<b>93,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.109: Contacto agregado - agregado tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras del tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 93, se presenta un valor máximo 102 y un mínimo 85 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 7,118, una variabilidad de 50,667 y un coeficiente de variación de 0,077; donde tenemos 2 datos superiores y 4 datos inferiores al valor medio.

Tomando en cuenta que cuando se tiene mayor punto de contacto agregados se obtiene mayor estabilidad.

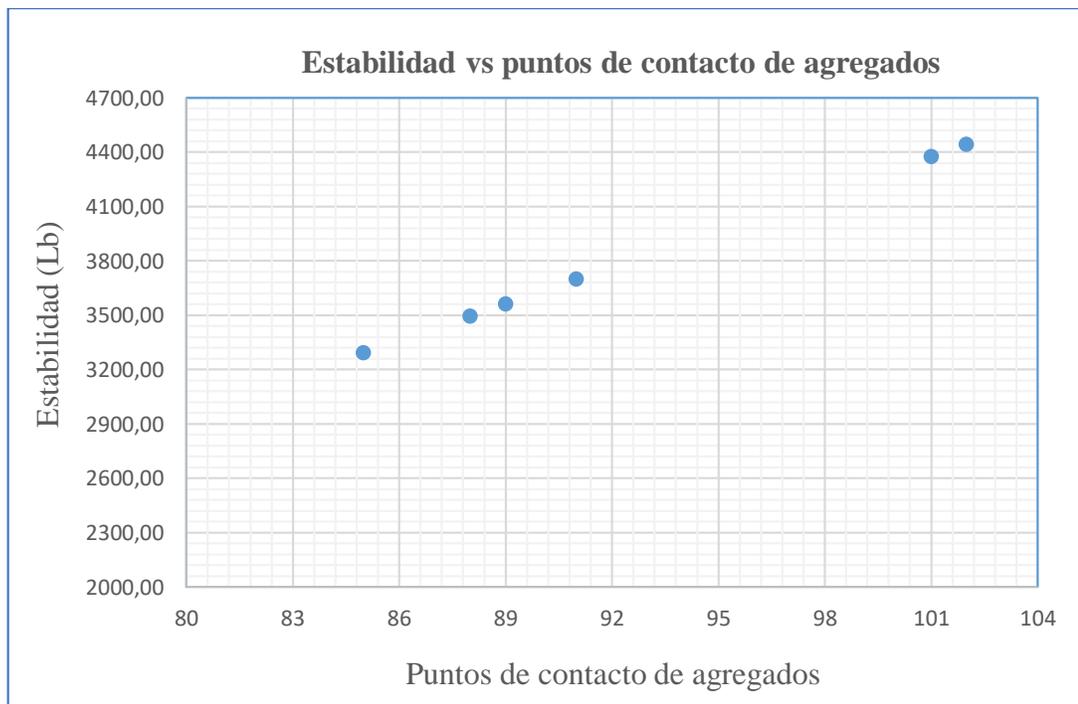
Con los puntos de contacto de los agregados determinados por medio de la tomografía computarizada con las imágenes digitales y a partir de la ecuación (4) obtenemos la estabilidad de la mezcla del tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas que es:

Tabla 3.78: Estabilidad tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
85,00	3291,830
88,00	3494,864
102,00	4442,356
101,00	4374,678
89,00	3562,542
91,00	3697,898

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.110: Estabilidad del tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas



Fuente: Elaboración propia

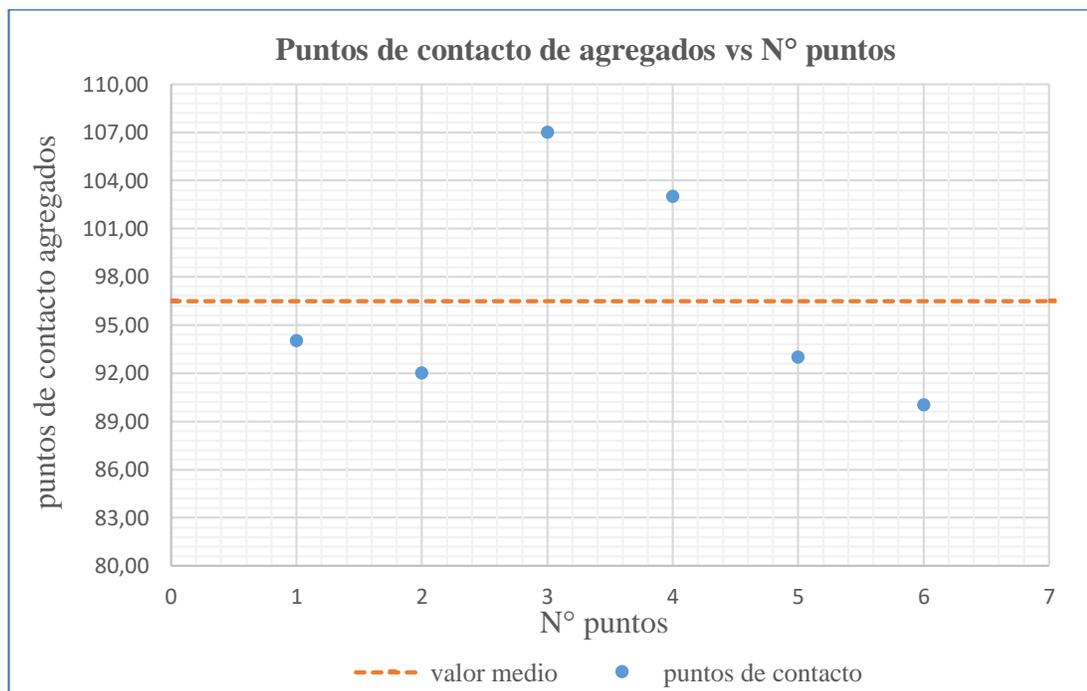
### Tramo N°3: Puente Jarcas - Piedra Larga

Tabla 3.79: Contacto agregado - agregado tramo Puente Jarcas - Piedra Larga

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	94,00
	2	92,00
2	3	107,00
	4	103,00
3	5	93,00
	6	90,00
<b>Valor medio</b>		<b>97,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.111: Contacto agregado - agregado tramo Puente Jarcas - Piedra Larga



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras del tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado -agregado es de 97, se presenta un valor máximo 107 y un mínimo 90 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 6,834, una variabilidad de 46,70

y un coeficiente de variación de 0,071; donde tenemos 2 datos superiores y 4 datos inferiores al valor medio.

En la figura 3.111 podemos observar que 2 valores se encuentran por encima del valor medio y 4 por debajo del valor medio.

Con los puntos de contacto de los agregados determinados con las imágenes digitales y a partir de la ecuación 4 obtenemos la estabilidad de la mezcla del tramo

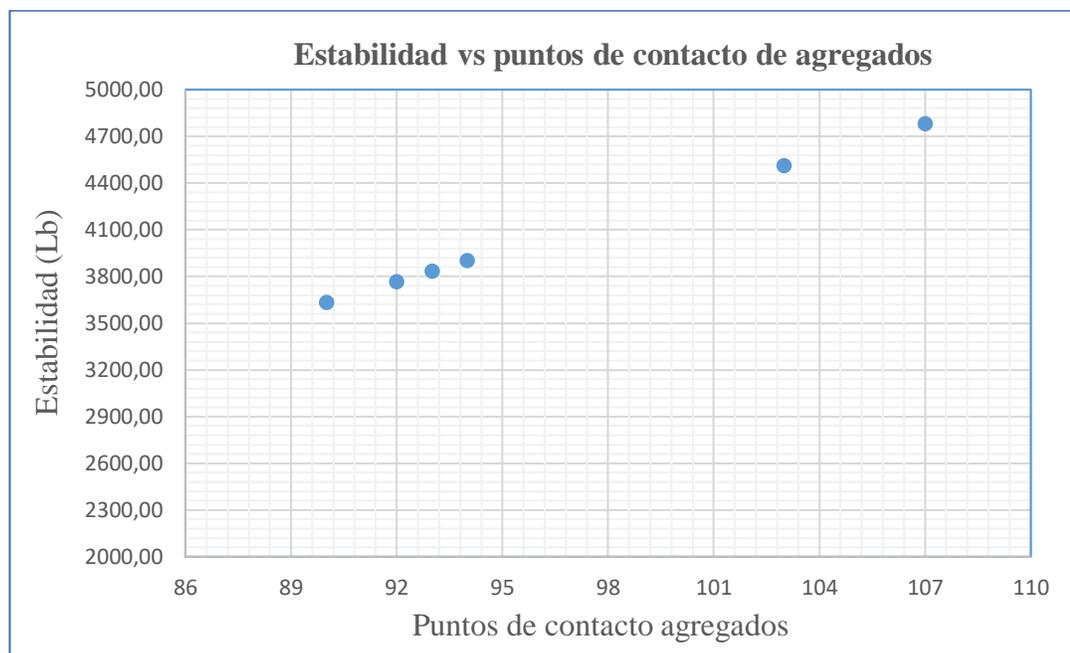
Con los puntos de contacto de los agregados determinados con las imágenes digitales y a partir de la ecuación 4 obtenemos la estabilidad de la mezcla del tramo Puente Jarcas - Piedra Larga que es:

Tabla 3.80: Estabilidad tramo Puente Jarcas - Piedra Larga

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
94,00	3900,932
92,00	3765,576
107,00	4780,746
103,00	4510,034
93,00	3833,254
90,00	3630,220

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.112: Estabilidad del tramo Puente Jarcas - Piedra Larga



Fuente: Elaboración propia

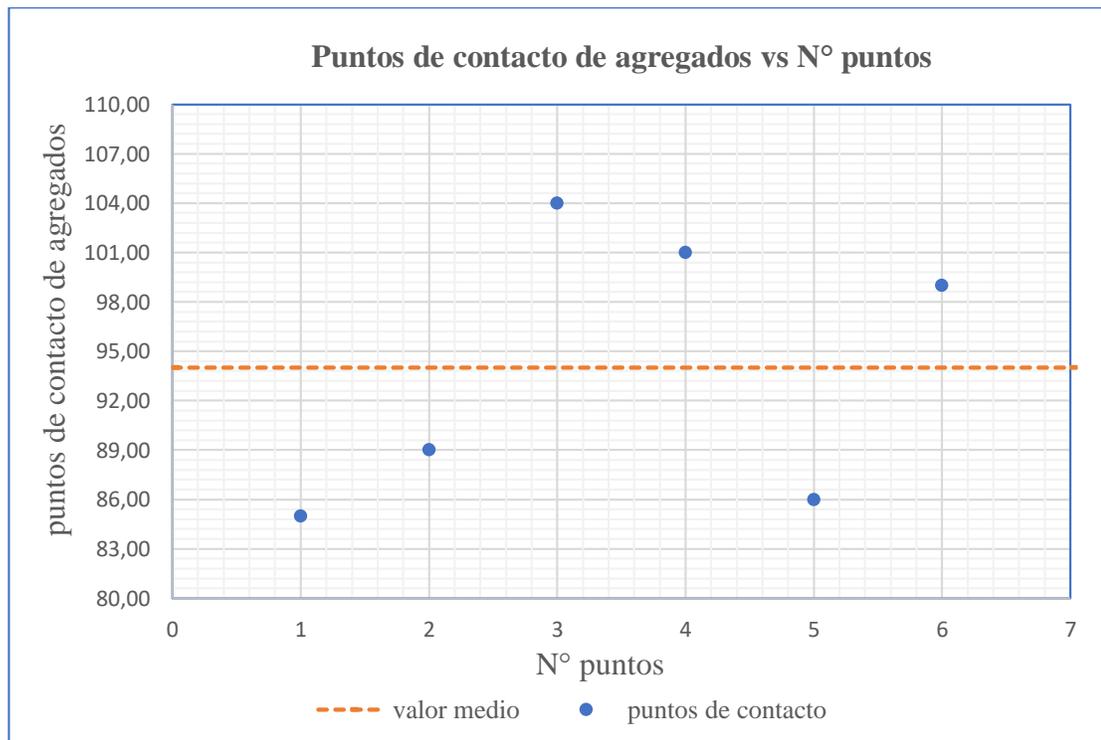
#### Tramo N°4: Piedra Larga - Canaletas

Tabla 3.81: Contacto agregado - agregado Piedra Larga - Canaletas

N° de núcleo	Imágenes transversales	N° puntos de contacto
1	1	85,00
	2	89,00
2	3	104,00
	4	101,00
3	5	86,00
	6	99,00
<b>Valor medio</b>		<b>94,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.113: Contacto agregado - agregado tramo Piedra Larga - Canaletas



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de las muestras del tramo Piedra Larga - Canaletas donde el valor medio del número de puntos de contacto agregado - agregado es de 94, se presenta un valor máximo 104 y un mínimo 85 puntos de contacto.

Las muestras presentan una desviación estándar de 8,295, una variabilidad de 68,80 y un coeficiente de variación de 0,088; donde tenemos 3 datos superiores y 3 datos inferiores al valor medio.

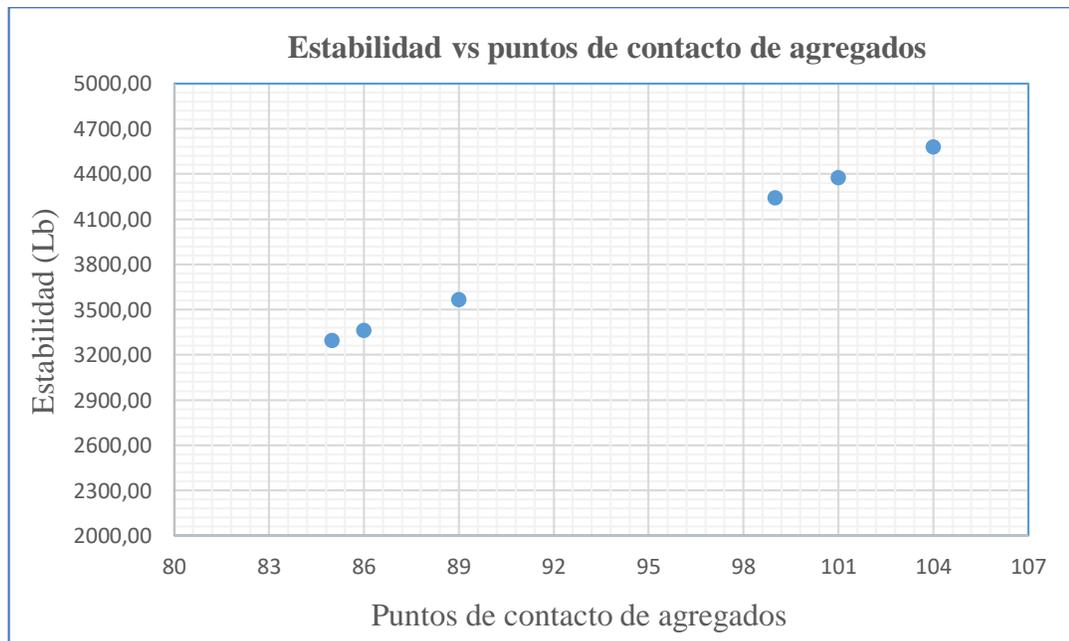
Con los puntos de contacto de los agregados determinados con las imágenes digitales y a partir de la ecuación 4 obtenemos la estabilidad de la mezcla del tramo Piedra Larga – Canaletas que es:

Tabla 3.82: Estabilidad tramo Piedra Larga - Canaletas

Puntos de contacto agregados (Tc)	Estabilidad (Libras)
85,00	3291,830
89,00	3562,542
104,00	4577,712
101,00	4374,678
86,00	3359,508
99,00	4239,322

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.114: Estabilidad tramo Piedra Larga - Canaletas



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2.3. Análisis general de los núcleos extraídos de H.A.M

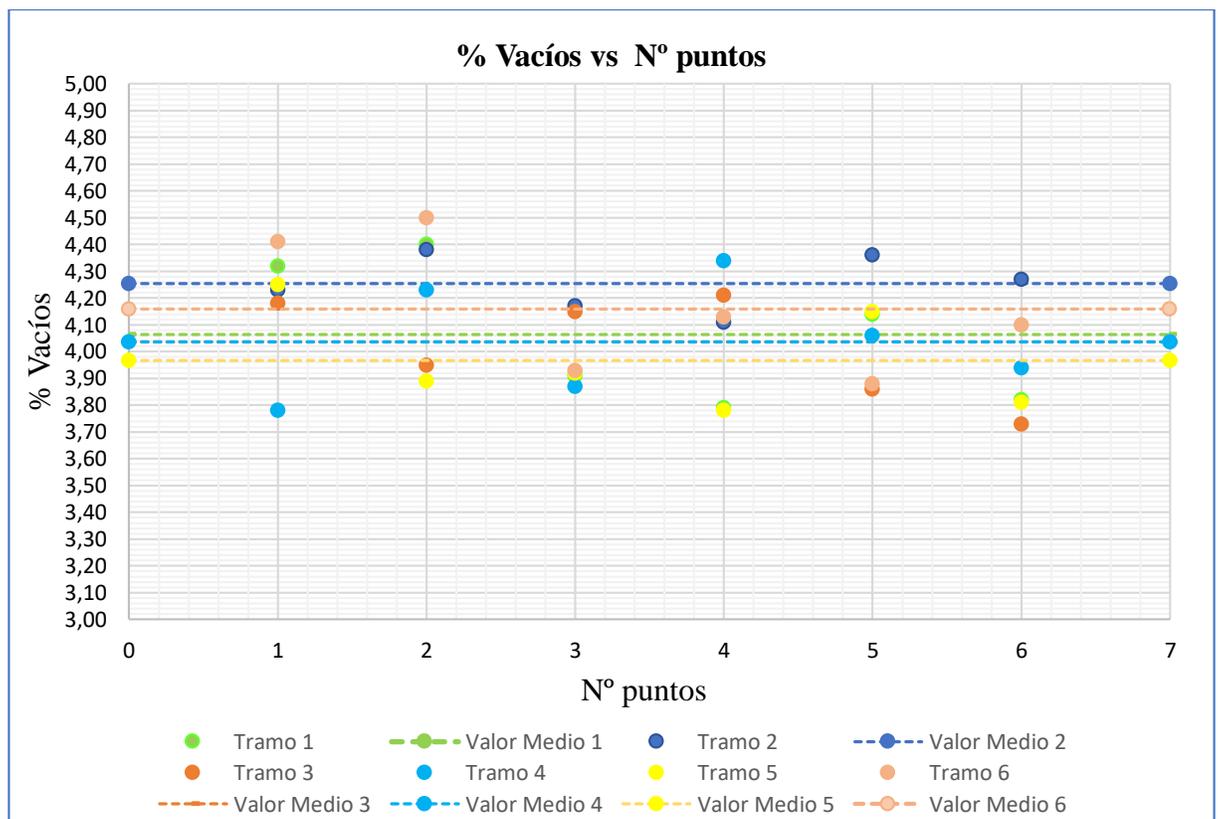
#### Análisis de porcentaje de vacíos

Tabla 3.83: % vacíos en general de H.A.M.

Imágenes transversales	Tramo N°1	Tramo N°2	Tramo N°3	Tramo N°4	Tramo N°5	Tramo N°6
1	4,32	4,23	4,18	3,78	4,25	4,41
2	4,40	4,38	3,95	4,23	3,89	4,50
3	3,91	4,17	4,15	3,87	3,92	3,93
4	3,79	4,11	4,21	4,34	3,78	4,13
5	4,14	4,36	3,86	4,06	4,15	3,88
6	3,82	4,27	3,73	3,94	3,81	4,10
<b>Valor medio</b>	<b>4,06</b>	<b>4,25</b>	<b>4,01</b>	<b>4,04</b>	<b>3,97</b>	<b>4,16</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.115: % vacíos en general de H.A.M.



Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que realizando un análisis en general de los núcleos extraídos de calles urbanas de la H.A.M tenemos una media de 4,08 %, por lo cual se encuentra superior a lo establecido en el diseño del 4 % de vacíos.

Las muestras presentan una desviación estándar de 0,217, una variabilidad de 0,047 y un coeficiente de variación de 0,053.

A partir de la gráfica tenemos el valor máximo de 4,50 % y valor mínimo de 3,73 % de vacíos.

El conjunto de los proyectos estudiados que son elaborados por la Alcaldía Municipal de Tarija, se encuentra dentro de lo establecido por norma del 3 a 5 % de vacíos, pero su valor medio del conjunto de datos es superior al 4 % de vacíos, el porcentaje de vacíos con el que se diseñó todos los proyectos de pavimento flexible, por lo que podemos decir que la mezcla asfáltica puesta en obra no cumple con lo establecido por diseño.

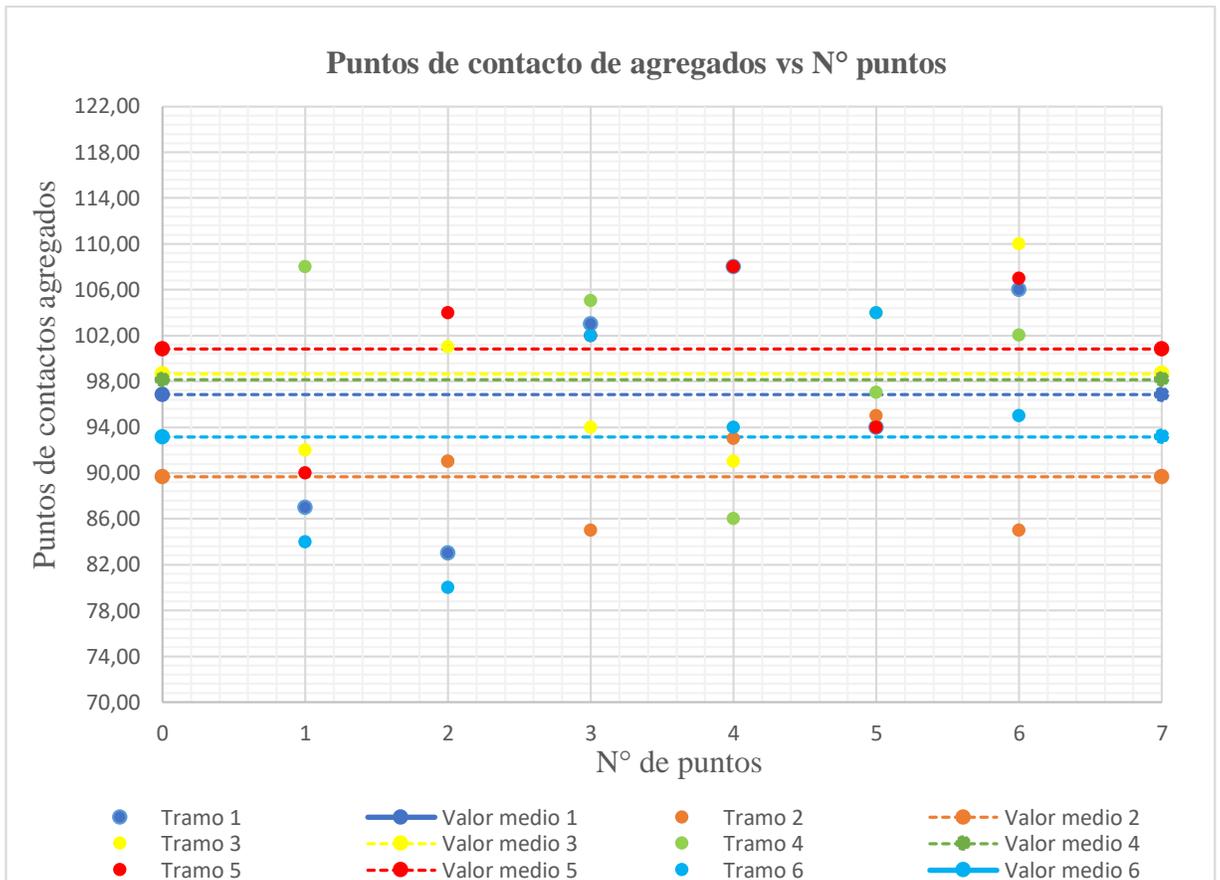
### **Análisis de contacto agregado - agregado**

Tabla 3.84: contacto agregado - agregado en general de H.A.M.

<b>N° cortes transversales</b>	<b>Tramo N°1</b>	<b>Tramo N°2</b>	<b>Tramo N°3</b>	<b>Tramo N°4</b>	<b>Tramo N°5</b>	<b>Tramo N°6</b>
1	87,00	91,00	92,00	108,00	90,00	84,00
2	83,00	85,00	101,00	91,00	104,00	80,00
3	103,00	93,00	94,00	105,00	102,00	102,00
4	108,00	95,00	91,00	86,00	108,00	94,00
5	94,00	85,00	104,00	97,00	94,00	104,00
6	106,00	89,00	110,00	102,00	107,00	95,00
<b>Valor medio</b>	<b>97,00</b>	<b>90,00</b>	<b>99,00</b>	<b>98,00</b>	<b>101,00</b>	<b>93,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.116: Contacto agregado - agregado en general de H.A.M



Del análisis general de todas las muestras extraídas de tramos de calles urbanas se obtuvo un valor medio de 96 puntos de contacto agregado - agregado, donde el conjunto de datos presenta una desviación estándar de 8,449, una variabilidad de 71,378 y un coeficiente de variación de 0,088.

El máximo valor de número de puntos de contacto de agregados es de 110 y un valor mínimo de 80 puntos.

### 3.5.2.4. Análisis general de los núcleos extraídos de SEDECA

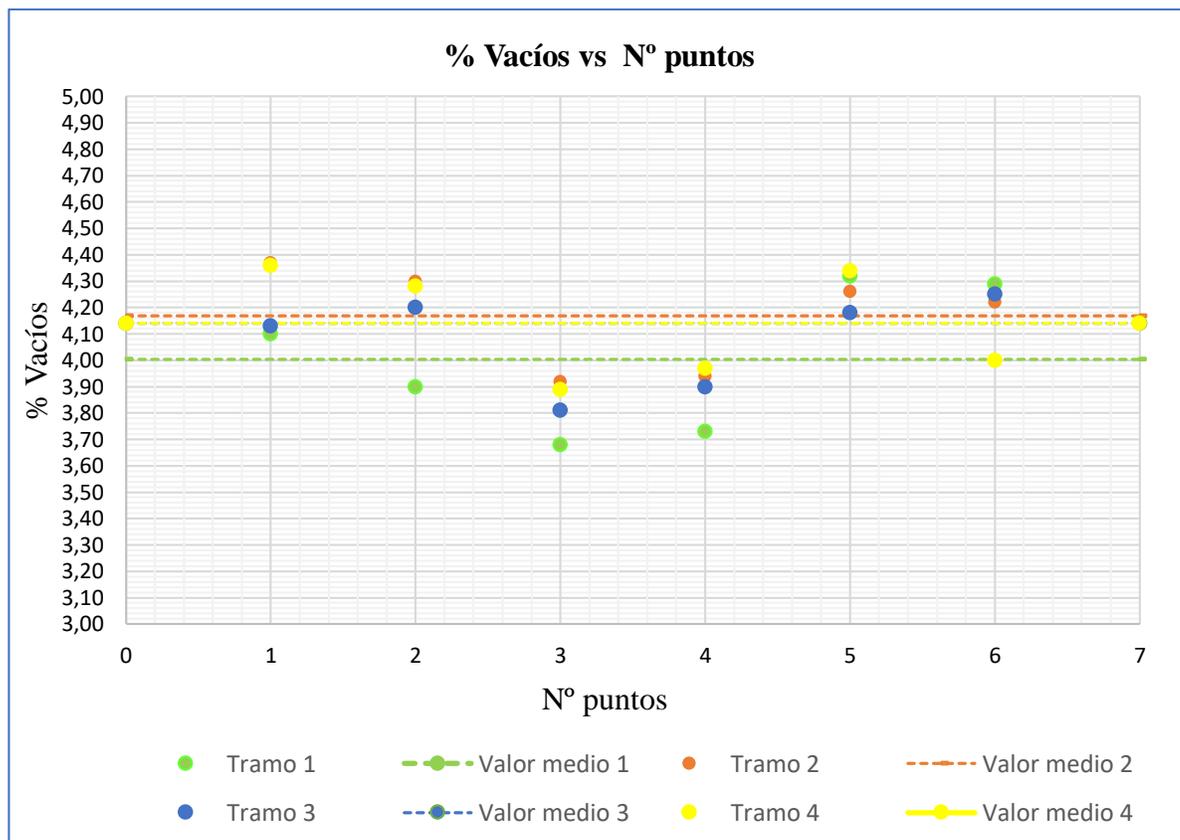
#### Análisis de porcentaje de vacíos

Tabla 3.85: % vacíos en general de SEDECA.

Imágenes transversales	Tramo N°1	Tramo N°2	Tramo N°3	Tramo N°4
1	4,10	4,37	4,13	4,36
2	3,90	4,30	4,20	4,28
3	3,68	3,92	3,81	3,89
4	3,73	3,94	3,90	3,97
5	4,32	4,26	4,18	4,34
6	4,29	4,22	4,25	4,00
<b>Valor medio</b>	<b>4,00</b>	<b>4,17</b>	<b>4,08</b>	<b>4,14</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.117: % Vacíos en general de SEDECA



Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que realizando un análisis de todas las muestras extraídas de los tramos de SEDECA tenemos un valor medio de 4,10 % siendo lo establecido por diseño del 4 % de vacíos.

El conjunto de datos presenta una desviación estándar de 0,213, una variabilidad de 0,045 y un coeficiente de variación de 0,052.

En la gráfica se observa que el valor máximo de vacíos es de 4,37 % y el valor mínimo de 3,68%.

Una vez realizado el análisis podemos decir que los proyectos analizados de SEDECA puestos en obra no cumplen con el porcentaje de vacíos el cual fueron diseñados.

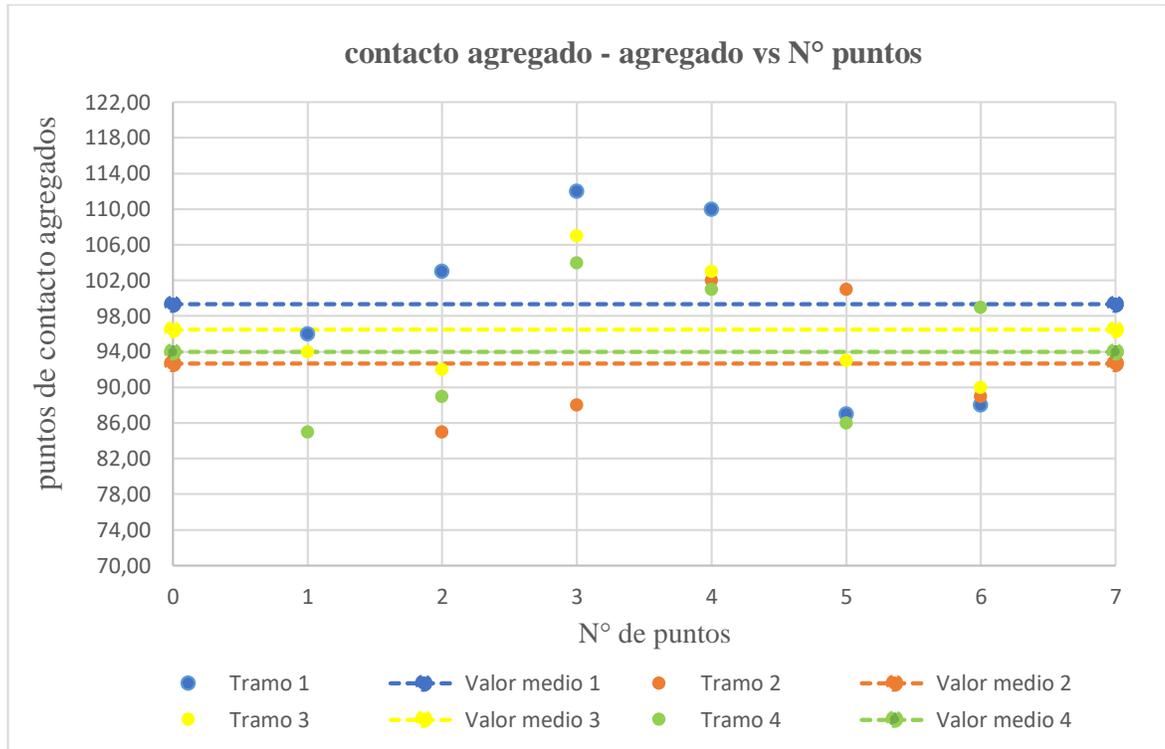
### **Análisis de contacto agregado - agregado**

Tabla 3.86: Análisis de contacto agregado - agregado general de SEDECA.

<b>N° cortes transversales</b>	<b>Tramo N°1</b>	<b>Tramo N°2</b>	<b>Tramo N°3</b>	<b>Tramo N°4</b>
1	96,00	85,00	94,00	85,00
2	103,00	88,00	92,00	89,00
3	112,00	102,00	107,00	104,00
4	110,00	101,00	103,00	101,00
5	87,00	89,00	93,00	86,00
6	88,00	91,00	90,00	99,00
<b>Valor medio</b>	<b>99,00</b>	<b>93,00</b>	<b>97,00</b>	<b>94,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.118: Contacto agregado - agregado general de SEDECA.



Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis general de todas las muestras extraídas se obtuvo un valor medio de 96 número de puntos de contacto agregado - agregado donde el conjunto de datos presenta una desviación estándar de 8,250, una variabilidad de 68,071 y un coeficiente de variación de 0,086.

El valor máximo que se presenta es de 112 y un valor mínimo de 85 números de puntos de contacto agregado - agregado.

### 3.5.2.5 Análisis para confiabilidad de datos

#### Método de confiabilidad coeficiente de Rulon

#### Porcentaje de Vacíos de núcleos extraídos (H.A.M)

Este modelo para calcular la confiabilidad por el método de las dos mitades fue desarrollado por Rulon (1939). En este caso solo se requiere:

Calcular la diferencia de varianza de las dos mitades para cada sujeto, dividir por la varianza de los puntajes totales, y restar esta proporción de la unidad (1,00).

Aplicando la fórmula de Rulon obtenemos el coeficiente de confiabilidad:

$$r_{tt} = 1 - \frac{S_d^2}{S_x^2}$$

$r_{tt}$  = Coeficiente de confiabilidad

$S_d^2$  = Es la varianza diferencial entre las dos mitades

$S_t^2$  = Es la varianza total de la prueba

Para la interpretación del coeficiente de confiabilidad se presenta la siguiente tabla:

Tabla 3.87: Interpretación del coeficiente de confiabilidad

Rangos	Magnitud
0,81 - 1,00	muy alta
0,61 - 0,80	alta
0,41 - 0,60	moderada
0,21 - 0,40	baja
0,01 - 0,20	muy baja

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.88: Coeficiente de confiabilidad para % vacíos HAM

Imágenes transversales	Tramo N°1	Tramo N°2	Tramo N°3	Tramo N°4	Tramo N°5	Tramo N°6	P1	P2	X	D
1	4,32	4,23	4,18	3,78	4,25	4,41	12,73	12,44	25,17	0,29
2	4,40	4,38	3,95	4,23	3,89	4,50	12,73	12,62	25,35	0,11
3	3,91	4,17	4,15	3,87	3,92	3,93	12,23	11,72	23,95	0,51
4	3,79	4,11	4,21	4,34	3,78	4,13	12,11	12,25	24,36	-0,14
5	4,14	4,36	3,86	4,06	4,15	3,88	12,36	12,09	24,45	0,27
6	3,82	4,27	3,73	3,94	3,81	4,10	11,82	11,85	23,67	-0,03
Suma	24,38	25,52	24,08	24,22	23,80	24,95	73,98	72,97	146,95	1,01
Media	4,06	4,25	4,01	4,04	3,97	4,16	12,33	12,16	24,49	0,17
Desv.Est.	0,24	0,10	0,18	0,20	0,17	0,23	0,33	0,31	0,60	0,22
Varianza	0,06	0,01	0,03	0,04	0,03	0,05	0,11	0,10	0,36	0,05

Fuente: Elaboración propia

Para el porcentaje de vacíos el coeficiente de confiabilidad es:

$$S_d^2 = 0,05$$

$$S_t^2 = 0,36$$

$$r_{tt} = 1 - \frac{0,05}{0,36}$$

$$r_{tt} = 0,87$$

El coeficiente de 0,87 se encuentra en el límite inferior de la categoría muy alta, por lo tanto, los datos obtenidos de las imágenes digitales son aceptables.

Tabla 3.89: Coeficiente de confiabilidad para % vacíos SEDECA

Imágenes transversales	Tramo N°1	Tramo N°2	Tramo N°3	Tramo N°4	P1	P2	X	D
1	4,10	4,37	4,13	4,36	8,47	8,49	16,96	-0,02
2	3,90	4,30	4,20	4,28	8,20	8,48	16,68	-0,28
3	3,68	3,92	3,81	3,89	7,60	7,70	15,30	-0,10
4	3,73	3,94	3,90	3,97	7,67	7,87	15,54	-0,20
5	4,32	4,26	4,18	4,34	8,58	8,52	17,10	0,06
6	4,29	4,22	4,25	4,00	8,51	8,25	16,76	0,26
Suma	24,02	25,01	24,47	24,84	49,03	49,31	98,34	-0,28
Media	4,00	4,17	4,08	4,14	8,17	8,22	16,39	-0,05
Desv.Est.	0,25	0,17	0,16	0,19	0,40	0,32	0,70	0,18
Varianza	0,06	0,03	0,03	0,04	0,16	0,10	0,49	0,03

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación de Rulon el coeficiente de confiabilidad es:

$$S_d^2 = 0,03$$

$$S_t^2 = 0,49$$

$$r_{tt} = 1 - \frac{0,03}{0,49}$$

$$r_{tt} = 0,94$$

El coeficiente de 0,94 se encuentra en el límite inferior de la categoría muy alta por los porcentajes de vacíos en núcleos de tramos de SEDECA obtenidos de las imágenes digitales confiables.

## Puntos de contacto de agregados de núcleos extraídos (H.A.M)

Tabla 3.90: Coeficiente de confiabilidad para contacto de agregados H.A.M

Imágenes transversales	Tramo N°1	Tramo N°2	Tramo N°3	Tramo N°4	Tramo N°5	Tramo N°6	P1	P2	X	D
1	87	91	92	108	90	84	270	282	552	-12
2	83	85	101	91	104	80	269	275	544	-6
3	103	93	94	105	102	102	290	309	599	-19
4	108	95	91	86	108	94	294	288	582	6
5	94	85	104	97	94	104	283	295	578	-12
6	106	89	110	102	107	95,00	305	304	609	1
Suma	581,00	538,00	592,00	589,00	605,00	559,00	1711,00	1753,00	3464,00	-42,0
Media	96,83	89,67	98,67	98,17	100,83	93,17	285,17	292,17	577,33	-7,00
Desv.Est.	9,51	3,77	6,92	7,73	6,64	8,73	12,85	11,88	23,26	8,45
Varianza	90,47	14,22	47,89	59,81	44,14	76,14	165,14	141,14	541,22	71,33

Fuente: Elaboración propia

$$S_d^2 = 71,33$$

$$S_t^2 = 541,22$$

$$r_{tt} = 1 - \frac{71,33}{541,22}$$

$$r_{tt} = 0,87$$

El coeficiente de 0,87 se encuentra en el límite inferior de la categoría muy alta, por lo tanto, el número de puntos de contacto de agregados en núcleos de tramos de HAM obtenidos de las imágenes digitales son confiables.

Tabla 3.91: Coeficiente de confiabilidad para contacto de agregados SEDECA

Imágenes transversales	Tramo N°1	Tramo N°2	Tramo N°3	Tramo N°4	P1	P2	X	D
1	96	85	94	85	181	179	360	2
2	103	88	92	89	191	181	372	10
3	112	102	107	104	214	211	425	3
4	110	101	103	101	211	204	415	7
5	87	89	93	86	176	179	355	-3
6	88	91	90	99	179	189	368	-10
Suma	596,00	556,00	579,00	564,00	1152,00	1143,00	2295,00	9,00
Media	99,33	92,67	96,50	94,00	192,00	190,50	382,50	1,50
Desv.Estandar	9,83	6,50	6,24	7,57	15,23	12,65	27,22	6,55
Varianza	96,56	42,22	38,92	57,33	232,00	159,92	740,92	42,92

Fuente: Elaboración propia

De la ecuación de Rulon el coeficiente de confiabilidad para los puntos de contacto de agregados es:

$$S_d^2 = 49,92$$

$$S_t^2 = 740,92$$

$$r_{tt} = 1 - \frac{49,92}{740,92}$$

$$r_{tt} = 0,94$$

El coeficiente de 0,94 se encuentra en el límite inferior de la categoría muy alta, por lo tanto, el número de puntos de contacto de agregados en núcleos de tramos de SEDECA obtenidos de las imágenes digitales son confiables.

Realizando este análisis de confiabilidad a los valores del análisis del procesamiento de imágenes digitales que se obtienen a través de la tomografía computarizada, se comprobó que los datos obtenidos son confiables, por lo tanto, se puede realizar este método de evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas,

### 3.5.3. Análisis del comportamiento dinámico de las mezclas

#### 3.5.3.1. Núcleos extraídos de tramos de H.A.M

**Tramo N°1: avenida Triple Vía**

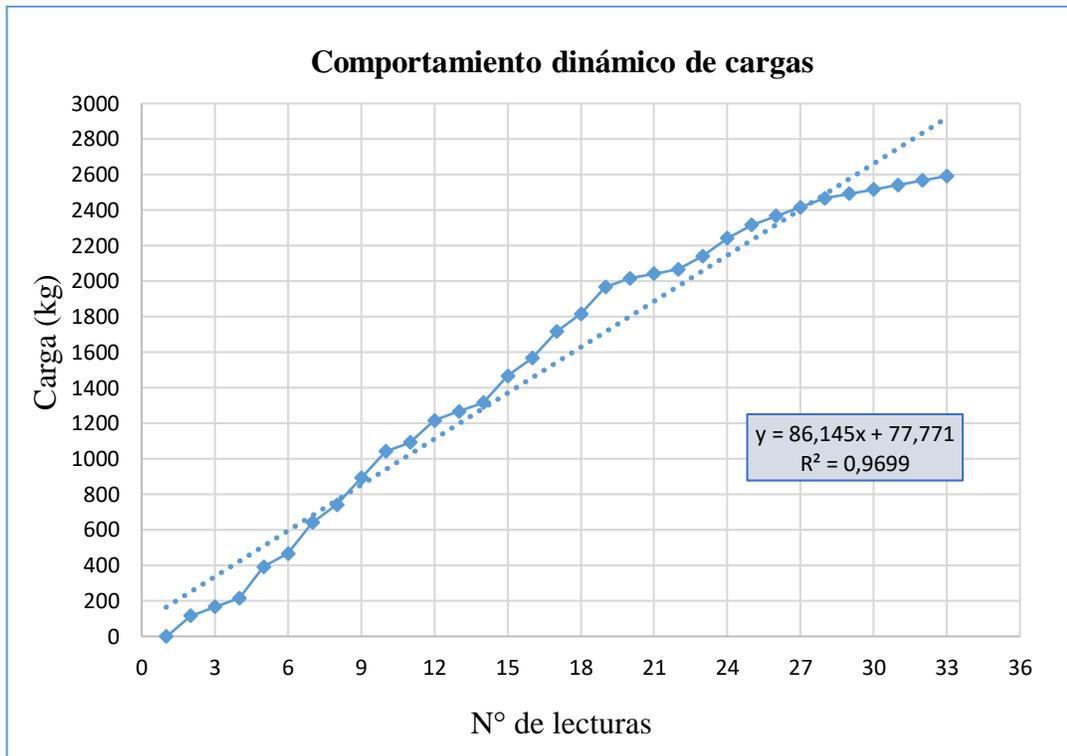
**Núcleo N°1**

Tabla 3.92: Cargas (kg) tramo N°1 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	12	1217,000	23	2142,000
2	117,000	13	1267,000	24	2242,000
3	167,000	14	1317,000	25	2317,000
4	217,000	15	1467,000	26	2367,000
5	392,000	16	1567,000	27	2417,000
6	467,000	17	1717,000	28	2467,000
7	642,000	18	1817,000	29	2492,000
8	742,000	19	1967,000	30	2517,000
9	892,000	20	2017,000	31	2542,000
10	1042,000	21	2042,000	32	2567,000
11	1092,000	22	2067,000	33	2592,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.119: Cargas vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°1



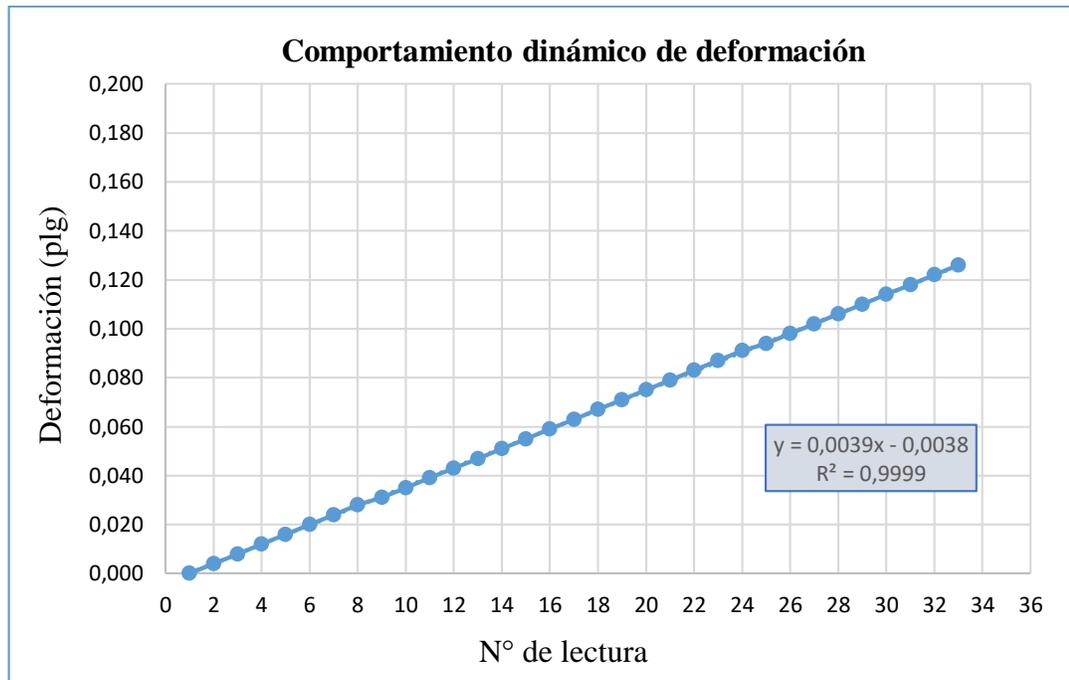
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.93: Deformación (plg) tramo N°1 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	12	0,043	23	0,087
2	0,004	13	0,047	24	0,091
3	0,008	14	0,051	25	0,094
4	0,012	15	0,055	26	0,098
5	0,016	16	0,059	27	0,102
6	0,020	17	0,063	28	0,106
7	0,024	18	0,067	29	0,110
8	0,028	19	0,071	30	0,114
9	0,031	20	0,075	31	0,118
10	0,035	21	0,079	32	0,122
11	0,039	22	0,083	33	0,126

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.120: Deformación vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Realizando este ensayo para medir el módulo dinámico del núcleo 1 del tramo de la avenida Triple Vía, en la figura 3.120 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2592 Kg con un desplazamiento de 0,126 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima obtenida es de 0,126 plg, la cual no alcanzó la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica que es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1plg. de diseño es el correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir, una carga de 1296 kg.

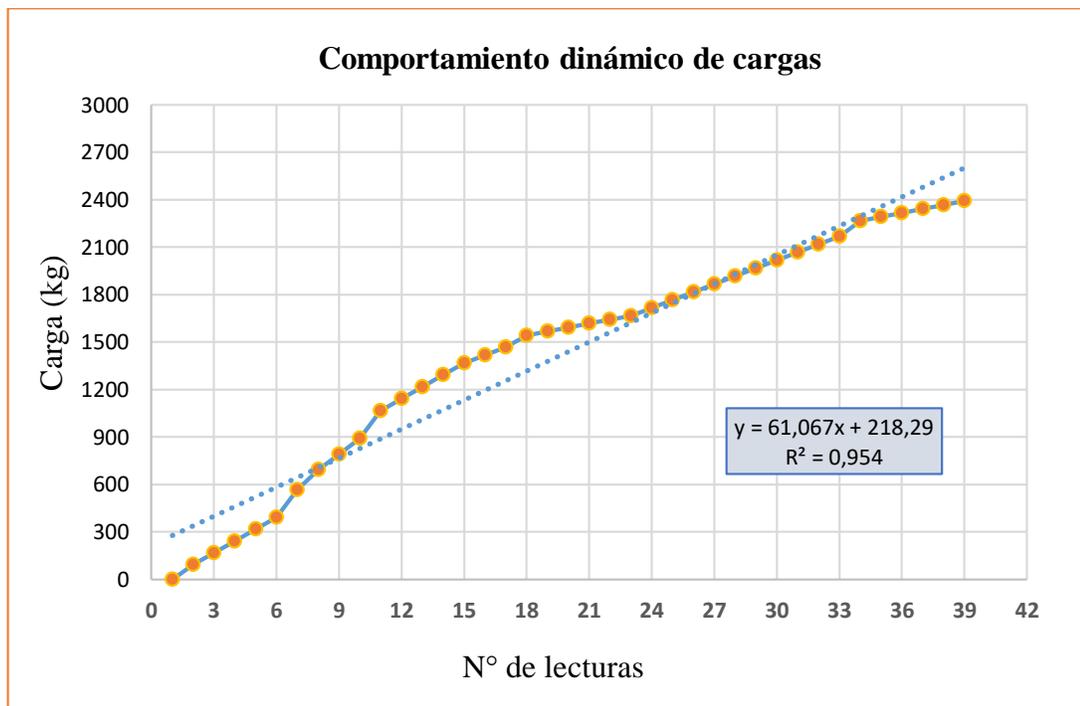
## Núcleo N°2

Tabla 3.94: Cargas (kg) tramo N°1 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	14	1292,000	27	1867,000
2	92,000	15	1367,000	28	1917,000
3	167,000	16	1417,000	29	1967,000
4	242,000	17	1467,000	30	2017,000
5	317,000	18	1542,000	31	2067,000
6	392,000	19	1567,000	32	2117,000
7	567,000	20	1592,000	33	2167,000
8	692,000	21	1617,000	34	2267,000
9	792,000	22	1642,000	35	2292,000
10	892,000	23	1667,000	36	2317,000
11	1067,000	24	1717,000	37	2342,000
12	1142,000	25	1767,000	38	2367,000
13	1217,000	26	1817,000	39	2392,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.121: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 1 - núcleo N°2



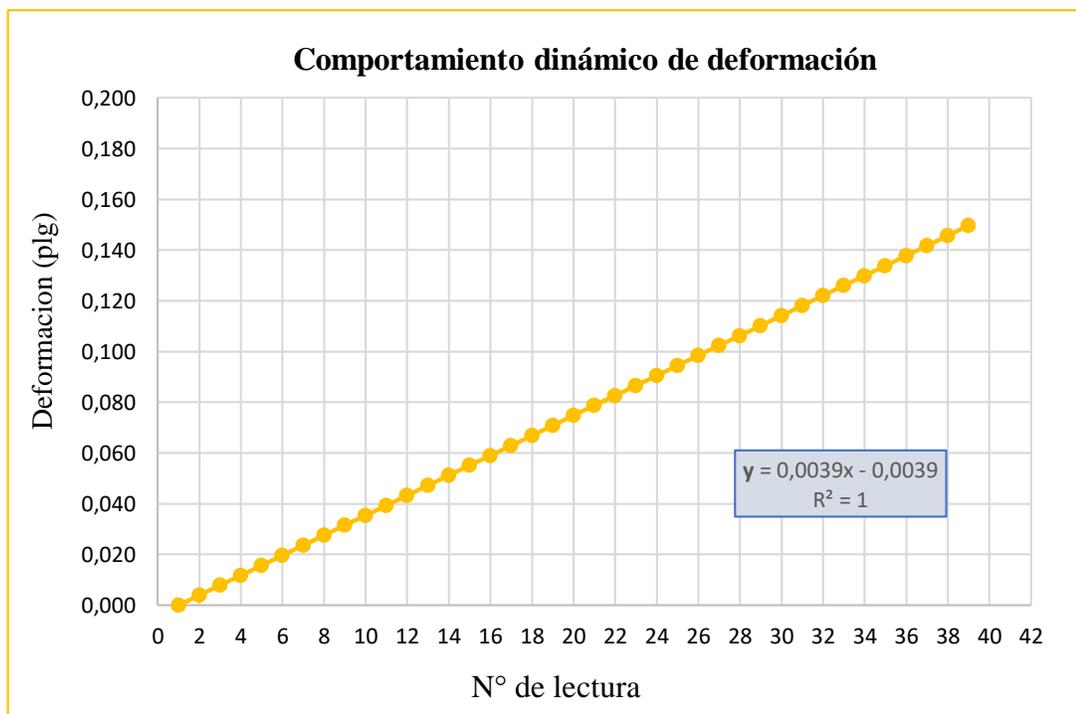
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.95: Deformación (plg) tramo N°1 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	14	0,051	27	0,102
2	0,004	15	0,055	28	0,106
3	0,008	16	0,059	29	0,110
4	0,012	17	0,063	30	0,114
5	0,016	18	0,067	31	0,118
6	0,020	19	0,071	32	0,122
7	0,024	20	0,075	33	0,126
8	0,028	21	0,079	34	0,130
9	0,031	22	0,083	35	0,134
10	0,035	23	0,087	36	0,138
11	0,039	24	0,091	37	0,142
12	0,043	25	0,094	38	0,146
13	0,047	26	0,098	39	0,150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.122: Deformación vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizando este ensayo para medir el módulo dinámico del núcleo 2 y aplicando una carga constante que produce la deformación de la mezcla asfáltica como condición dinámica, que se presenta en la figura 3.121, se puede observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2392 kg con un desplazamiento de 0,126 plg.

La figura 3.122 representa el comportamiento de deformación que es de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,150 plg. que es menor a la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica que es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg de diseño es el correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir, una carga de 1196 kg.

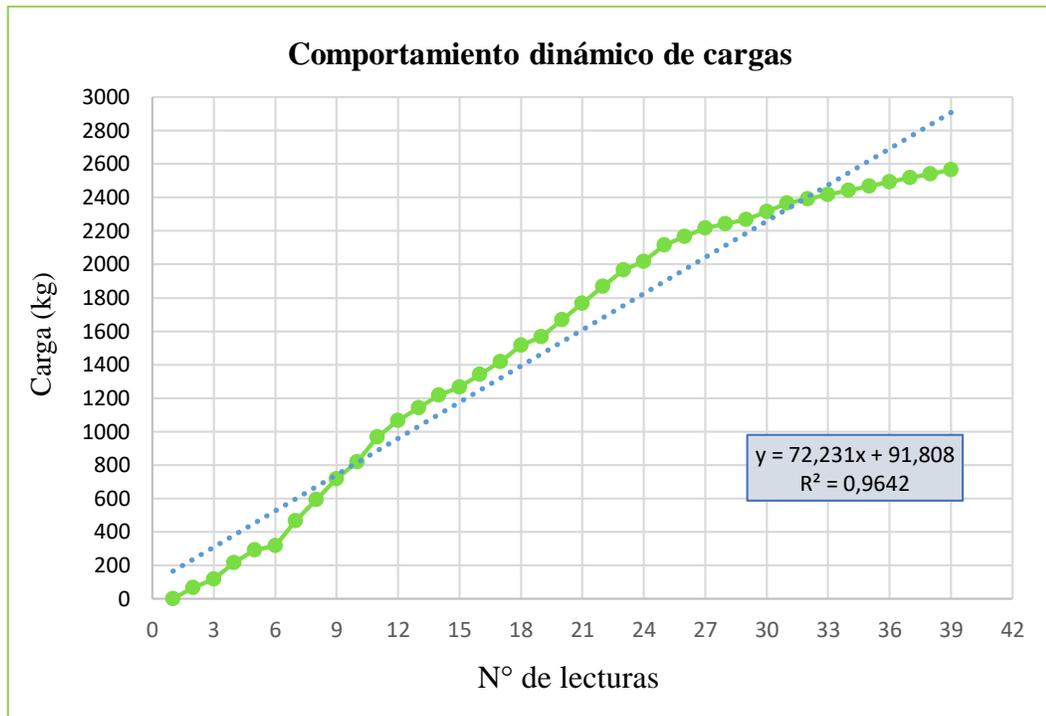
### Núcleo N°3

Tabla 3.96: Cargas (kg) tramo N°1 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	14	1217,000	27	2217,000
2	67,000	15	1267,000	28	2242,000
3	117,000	16	1342,000	29	2267,000
4	217,000	17	1417,000	30	2317,000
5	292,000	18	1517,000	31	2367,000
6	317,000	19	1567,000	32	2392,000
7	467,000	20	1667,000	33	2417,000
8	592,000	21	1767,000	34	2442,000
9	717,000	22	1867,000	35	2467,000
10	817,000	23	1967,000	36	2492,000
11	967,000	24	2017,000	37	2517,000
12	1067,000	25	2117,000	38	2542,000
13	1142,000	26	2167,000	39	2567,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.123: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 1 - núcleo N°3



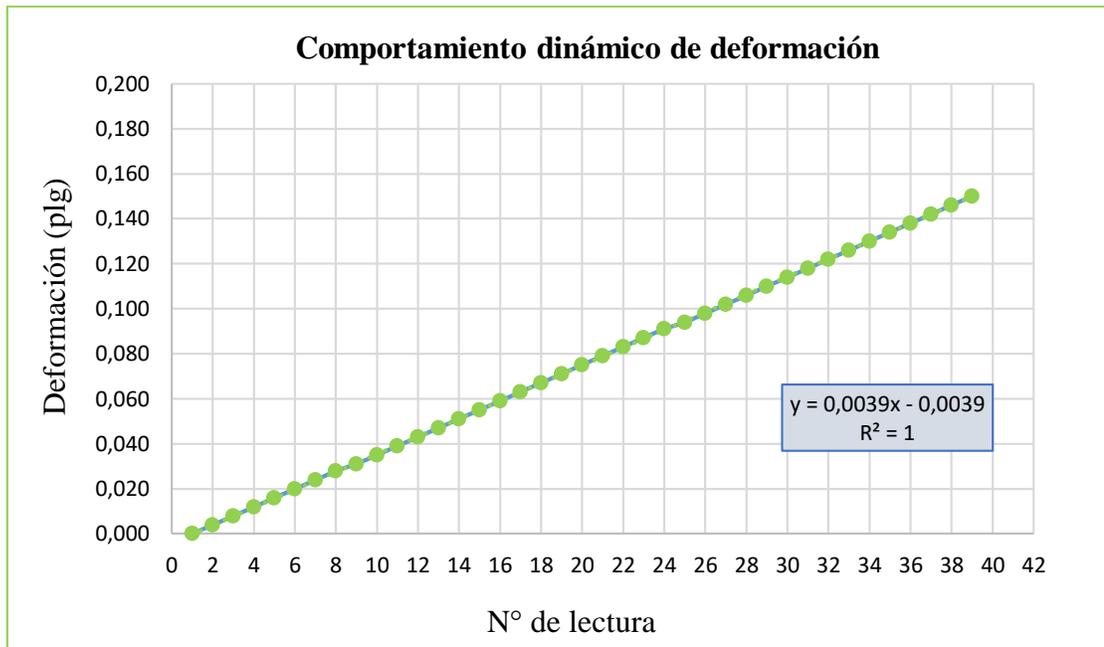
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.97: Deformación (plg) tramo N°1 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	14	0,051	27	0,102
2	0,004	15	0,055	28	0,106
3	0,008	16	0,059	29	0,110
4	0,012	17	0,063	30	0,114
5	0,016	18	0,067	31	0,118
6	0,020	19	0,071	32	0,122
7	0,024	20	0,075	33	0,126
8	0,028	21	0,079	34	0,130
9	0,031	22	0,083	35	0,134
10	0,035	23	0,087	36	0,138
11	0,039	24	0,091	37	0,142
12	0,043	25	0,094	38	0,146
13	0,047	26	0,098	39	0,150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.124: Deformación vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°3



Fuente: Elaboración propia

Realizando este ensayo para medir el módulo dinámico del núcleo 3 que se presenta en la figura 3.123 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde, a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2567 kg con un desplazamiento de 0,150 plg.

En la figura 3.124 la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,150 plg; siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1283,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo de la avenida Triple Vía ninguno de estos núcleos llegó a la máxima deformación teniendo una variación de deformación de 0,024 plg, por lo cual depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

**Tramo N°2: avenida Delio Echazú**

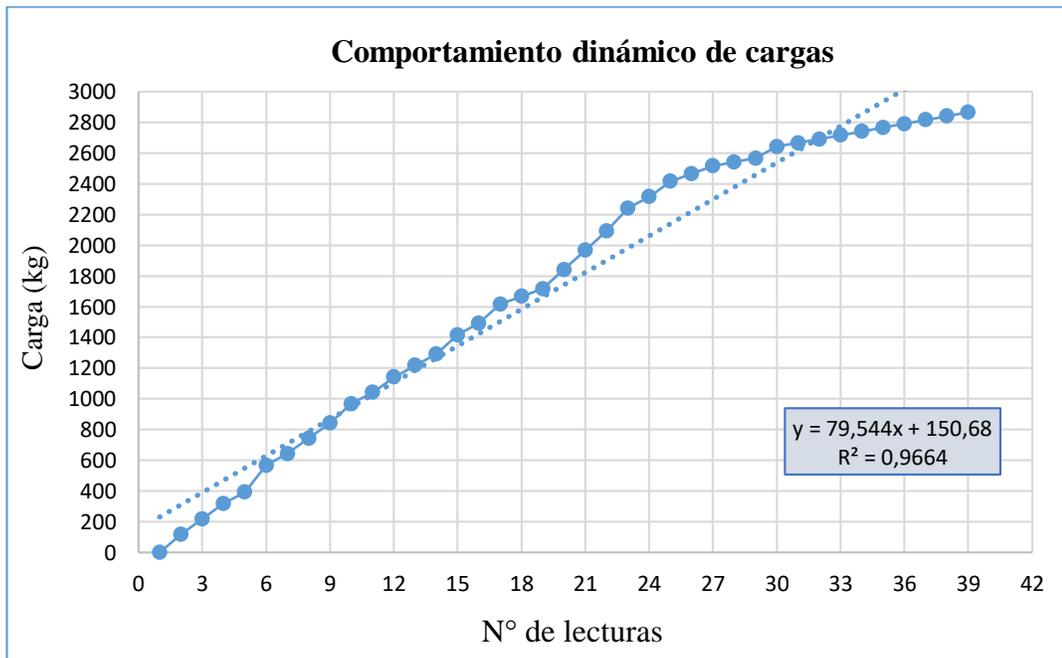
**Núcleo N°1**

Tabla 3.98: Cargas (kg) tramo N°2 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	14	1292,000	27	2517,000
2	117,000	15	1417,000	28	2542,000
3	217,000	16	1492,000	29	2567,000
4	317,000	17	1617,000	30	2642,000
5	392,000	18	1667,000	31	2667,000
6	567,000	19	1717,000	32	2692,000
7	642,000	20	1842,000	33	2717,000
8	742,000	21	1967,000	34	2742,000
9	842,000	22	2092,000	35	2767,000
10	967,000	23	2242,000	36	2792,000
11	1042,000	24	2317,000	37	2817,000
12	1142,000	25	2417,000	38	2842,000
13	1217,000	26	2467,000	39	2867,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.125: Cargas vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°1



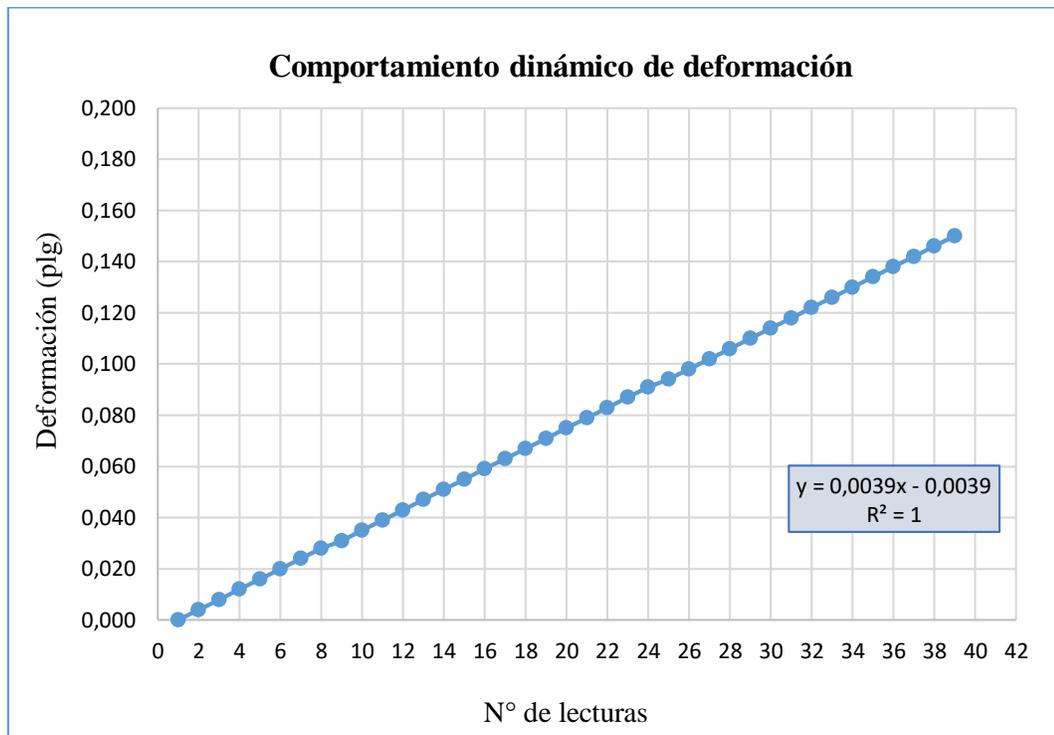
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.99: Deformación (plg) tramo N°2 -núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	14	0,051	27	0,102
2	0,004	15	0,055	28	0,106
3	0,008	16	0,059	29	0,110
4	0,012	17	0,063	30	0,114
5	0,016	18	0,067	31	0,118
6	0,020	19	0,071	32	0,122
7	0,024	20	0,075	33	0,126
8	0,028	21	0,079	34	0,130
9	0,031	22	0,083	35	0,134
10	0,035	23	0,087	36	0,138
11	0,039	24	0,091	37	0,142
12	0,043	25	0,094	38	0,146
13	0,047	26	0,098	39	0,150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.126: Deformación vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Realizando este ensayo al núcleo 1 del tramo calle Delio Echazú, aplicando una carga constante que produce la deformación de la mezcla asfáltica como condición dinámica, que se presenta en la figura 3.125 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2867 kg con un desplazamiento de 0,15 plg.

Así mismo la deformación donde tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,15 plg; siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1433,5 kg.

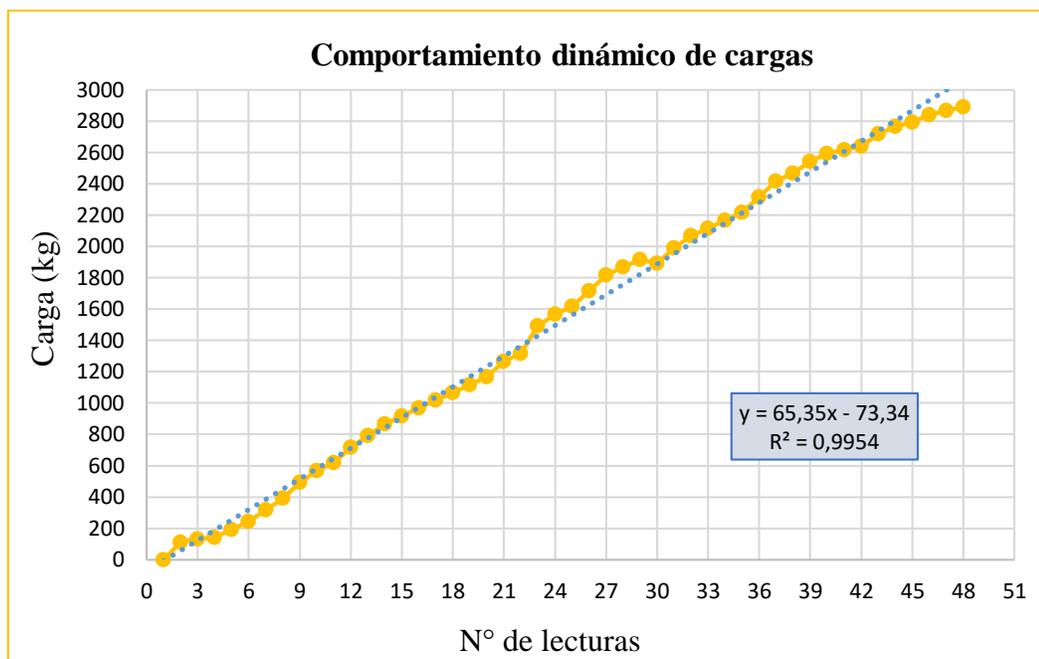
## Núcleo N°2

Tabla 3.100: Cargas (kg) tramo N°2 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	17	1017,000	33	2117,000
2	112,000	18	1067,000	34	2167,000
3	129,500	19	1117,000	35	2217,000
4	142,000	20	1167,000	36	2317,000
5	192,000	21	1267,000	37	2417,000
6	242,000	22	1317,000	38	2467,000
7	317,000	23	1492,000	39	2542,000
8	392,000	24	1567,000	40	2592,000
9	492,000	25	1617,000	41	2617,000
10	567,000	26	1717,000	42	2642,000
11	617,000	27	1817,000	43	2717,000
12	717,000	28	1867,000	44	2767,000
13	792,000	29	1917,000	45	2792,000
14	867,000	30	1892,000	46	2842,000
15	917,000	31	1992,000	47	2867,000
16	967,000	32	2067,000	48	2892,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.127: Cargas vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°2



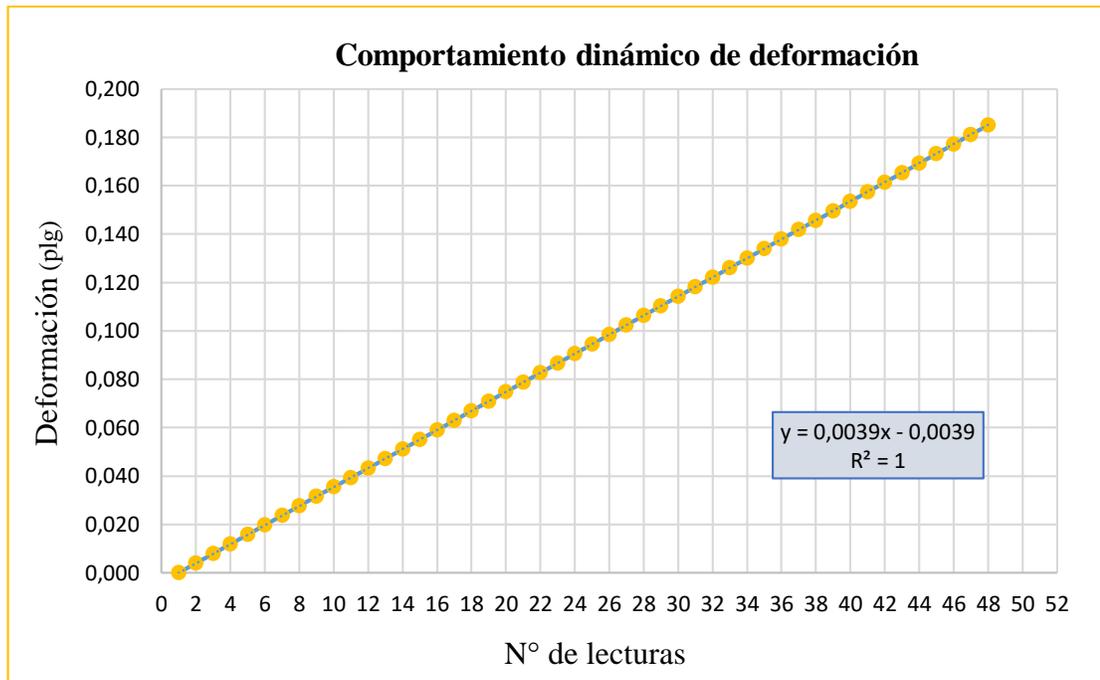
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.101: Deformación (plg) tramo N°2 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	17	0,063	33	0,126
2	0,004	18	0,067	34	0,130
3	0,008	19	0,071	35	0,134
4	0,012	20	0,075	36	0,138
5	0,016	21	0,079	37	0,142
6	0,020	22	0,083	38	0,146
7	0,024	23	0,087	39	0,150
8	0,028	24	0,091	40	0,154
9	0,031	25	0,094	41	0,157
10	0,035	26	0,098	42	0,161
11	0,039	27	0,102	43	0,165
12	0,043	28	0,106	44	0,169
13	0,047	29	0,110	45	0,173
14	0,051	30	0,114	46	0,177
15	0,055	31	0,118	47	0,181
16	0,059	32	0,122	48	0,185

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.128: Deformación vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizando este de aplicación de una carga constante que produce deformación a la mezcla asfáltica al núcleo 2, se observa en la figura 3.127 y demuestra que tiene un comportamiento es de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que aumenta la deformación aumenta la carga; obteniendo una carga máxima de 2982 kg. con un desplazamiento de 0,158plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,1865 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1491 kg.

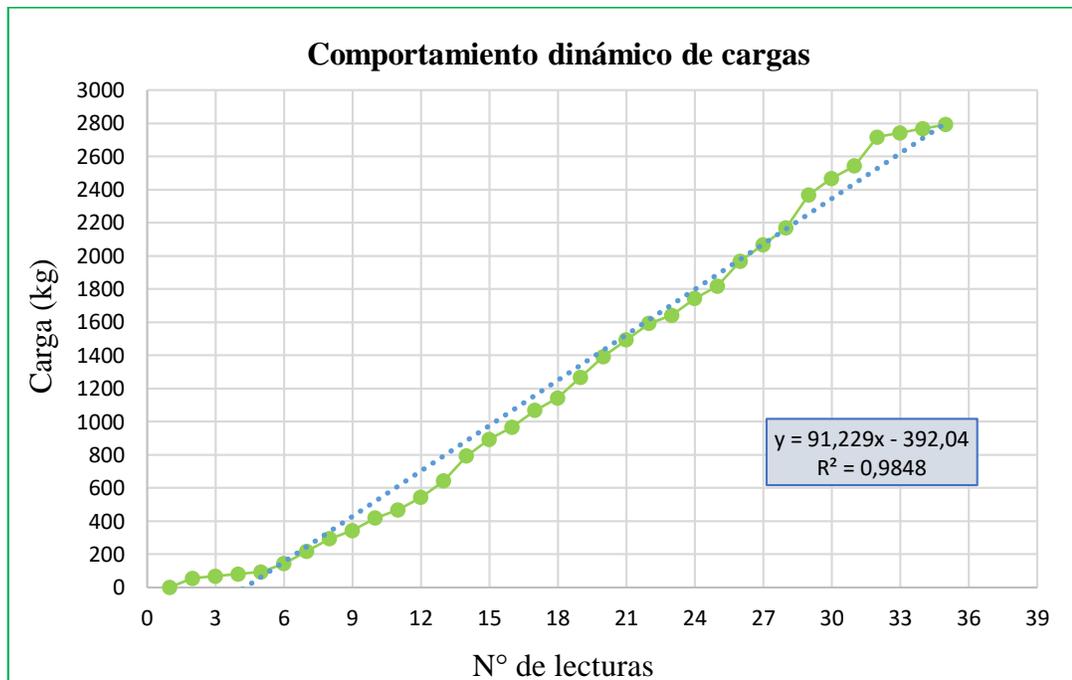
### Núcleo N°3

Tabla 3.102: Cargas (kg) tramo N°2 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	13	642,000	25	1817,000
2	54,500	14	792,000	26	1967,000
3	67,000	15	892,000	27	2067,000
4	79,500	16	967,000	28	2167,000
5	92,000	17	1067,000	29	2367,000
6	142,000	18	1142,000	30	2467,000
7	217,000	19	1267,000	31	2542,000
8	292,000	20	1392,000	32	2717,000
9	342,000	21	1492,000	33	2742,000
10	417,000	22	1592,000	34	2767,000
11	467,000	23	1642,000	35	2792,000
12	542,000	24	1742,000	36	2817,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.129: Cargas vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°3



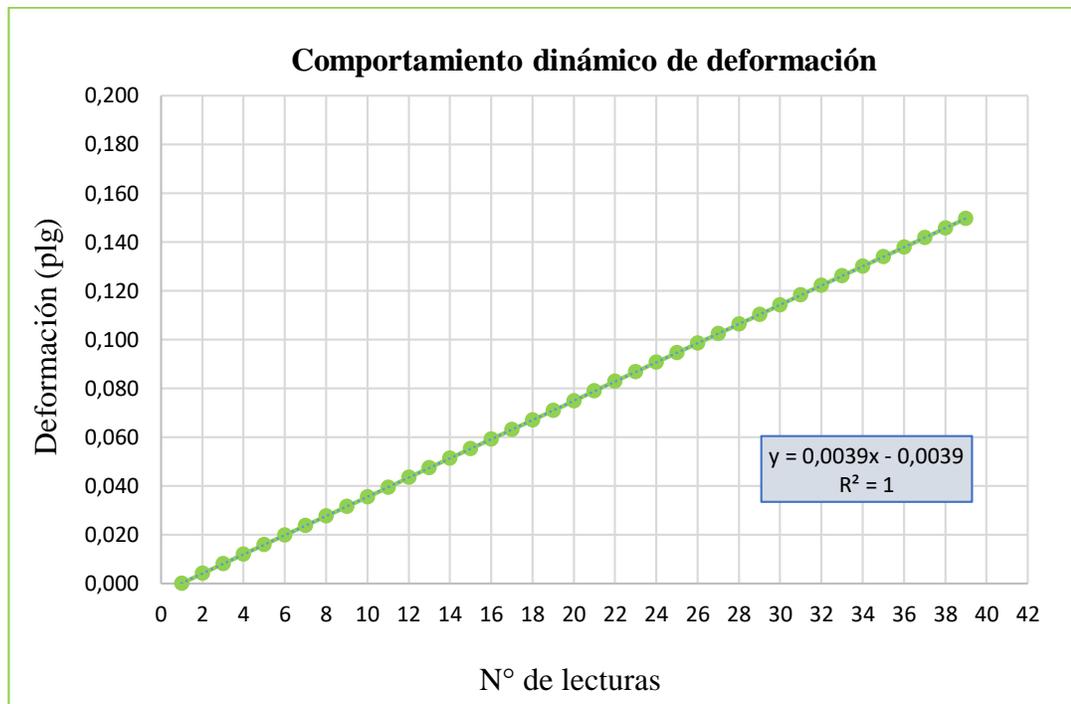
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.103: Deformación (plg) tramo N°2 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	13	0,047	25	0,094
2	0,004	14	0,051	26	0,098
3	0,008	15	0,055	27	0,102
4	0,012	16	0,059	28	0,106
5	0,016	17	0,063	29	0,110
6	0,020	18	0,067	30	0,114
7	0,024	19	0,071	31	0,118
8	0,028	20	0,075	32	0,122
9	0,031	21	0,079	33	0,126
10	0,035	22	0,083	34	0,130
11	0,039	23	0,087	35	0,134
12	0,043	24	0,091	36	0,138

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.130: Deformación vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°3



Fuente: Elaboración propia

Realizando el núcleo 3 podemos observar en la figura 3.129 que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2817 kg con un desplazamiento de 0,138 plg.

En la figura 3.130 se observa que la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,138 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación al 0,1 pág. de diseño la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, una carga de 1408,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo calle Delio Echazú ninguno de ellos llegó a la máxima deformación donde la máxima deformación que se produce es de 0,16 plg, y la mínima es de 0,14 plg la cual depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

### **Tramo N°3: avenida Felipe Palazón**

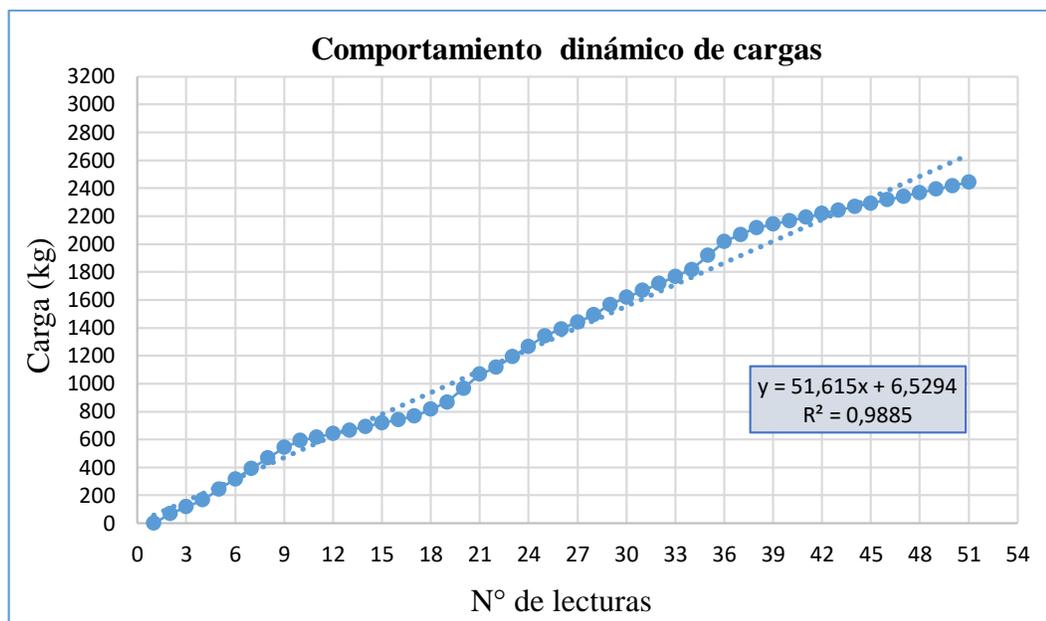
#### **Núcleo N°1**

Tabla 3.104: Cargas (kg) tramo N°3 - nucleó N°1

<b>N° de lecturas</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>N° de lecturas</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>N° de lecturas</b>	<b>Carga (kg)</b>
1	0,000	18	817,000	35	1917,000
2	67,000	19	867,000	36	2017,000
3	117,000	20	967,000	37	2067,000
4	167,000	21	1067,000	38	2117,000
5	242,000	22	1117,000	39	2142,000
6	317,000	23	1192,000	40	2167,000
7	392,000	24	1267,000	41	2192,000
8	467,000	25	1342,000	42	2217,000
9	542,000	26	1392,000	43	2242,000
10	592,000	27	1442,000	44	2267,000
11	617,000	28	1492,000	45	2292,000
12	642,000	29	1567,000	46	2317,000
13	667,000	30	1617,000	47	2342,000
14	692,000	31	1667,000	48	2367,000
15	717,000	32	1717,000	49	2392,000
16	742,000	33	1767,000	50	2417,000
17	767,000	34	1817,000	51	2442,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.131: Cargas vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°1



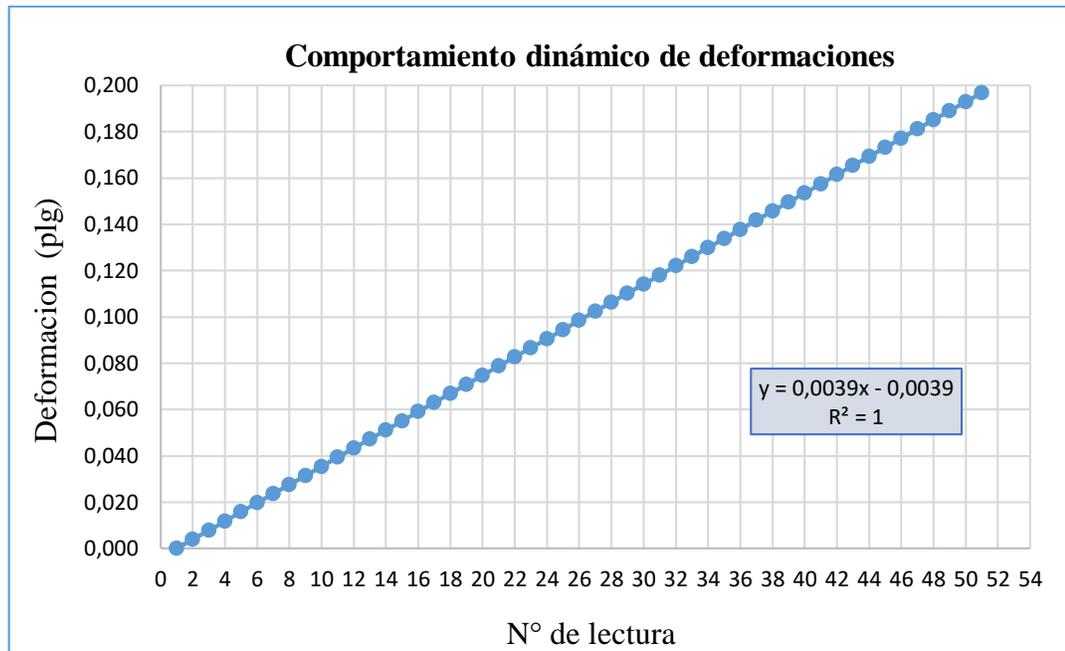
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.105: Deformación (plg) tramo N°3 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	18	0,067	35	0,134
2	0,004	19	0,071	36	0,138
3	0,008	20	0,075	37	0,142
4	0,012	21	0,079	38	0,146
5	0,016	22	0,083	39	0,150
6	0,020	23	0,087	40	0,154
7	0,024	24	0,091	41	0,157
8	0,028	25	0,094	42	0,161
9	0,031	26	0,098	43	0,165
10	0,035	27	0,102	44	0,169
11	0,039	28	0,106	45	0,173
12	0,043	29	0,110	46	0,177
13	0,047	30	0,114	47	0,181
14	0,051	31	0,118	48	0,185
15	0,055	32	0,122	49	0,189
16	0,059	33	0,126	50	0,193
17	0,063	34	0,130	51	0,197

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.132: Deformación vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Realizando la aplicación de una carga constante que produce deformación podemos observar al núcleo 1 del tramo de la avenida Felipe Palazzón, en la figura 3.131 donde podemos observar que tiene un comportamiento es de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que incrementa aumenta la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2442 kg. con un desplazamiento de 0,197plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,197 plg. siendo que a la cual la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación al 0,1 plg, de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1221kg.

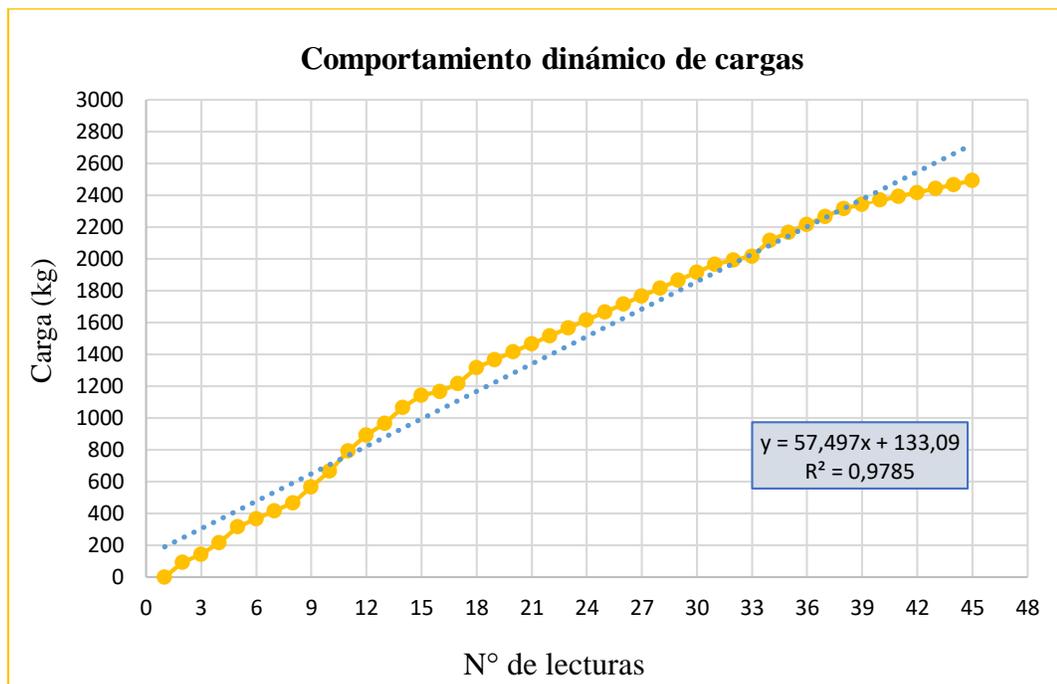
## Núcleo N°2

Tabla 3.106: Cargas (kg) tramo N°3 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	16	1167,000	31	1967,000
2	92,000	17	1217,000	32	1992,000
3	142,000	18	1317,000	33	2017,000
4	217,000	19	1367,000	34	2117,000
5	317,000	20	1417,000	35	2167,000
6	367,000	21	1467,000	36	2217,000
7	417,000	22	1517,000	37	2267,000
8	467,000	23	1567,000	38	2317,000
9	567,000	24	1617,000	39	2342,000
10	667,000	25	1667,000	40	2367,000
11	792,000	26	1717,000	41	2392,000
12	892,000	27	1767,000	42	2417,000
13	967,000	28	1817,000	43	2442,000
14	1067,000	29	1867,000	44	2467,000
15	1142,000	30	1917,000	45	2492,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.133: Cargas vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°2



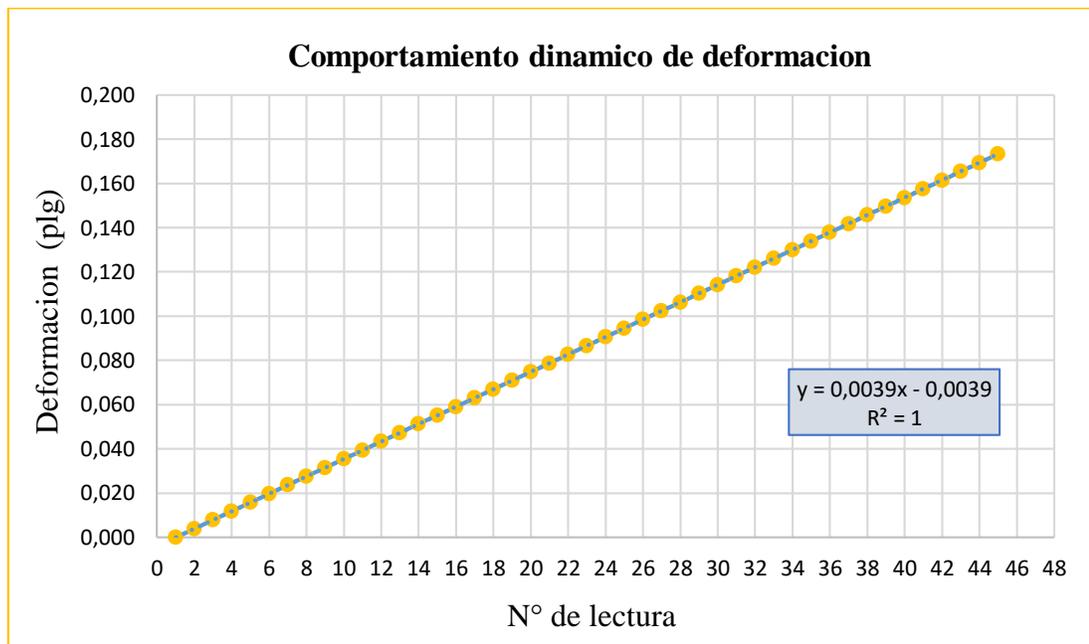
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.107: Deformación (plg) tramo N°3 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	16	0,059	31	0,118
2	0,004	17	0,063	32	0,122
3	0,008	18	0,067	33	0,126
4	0,012	19	0,071	34	0,130
5	0,016	20	0,075	35	0,134
6	0,020	21	0,079	36	0,138
7	0,024	22	0,083	37	0,142
8	0,028	23	0,087	38	0,146
9	0,031	24	0,091	39	0,150
10	0,035	25	0,094	40	0,154
11	0,039	26	0,098	41	0,157
12	0,043	27	0,102	42	0,161
13	0,047	28	0,106	43	0,165
14	0,051	29	0,110	44	0,169
15	0,055	30	0,114	45	0,173

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.134: Deformación vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis del núcleo de la avenida Felipe Palazón, aplicando una carga constante que provoca que una deformación donde podemos observar en la figura 3.133 podemos observar que tiene un comportamiento es casi de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2492 kg. con un desplazamiento de 0,173 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,173 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg de deseo es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir carga de 1246 kg.

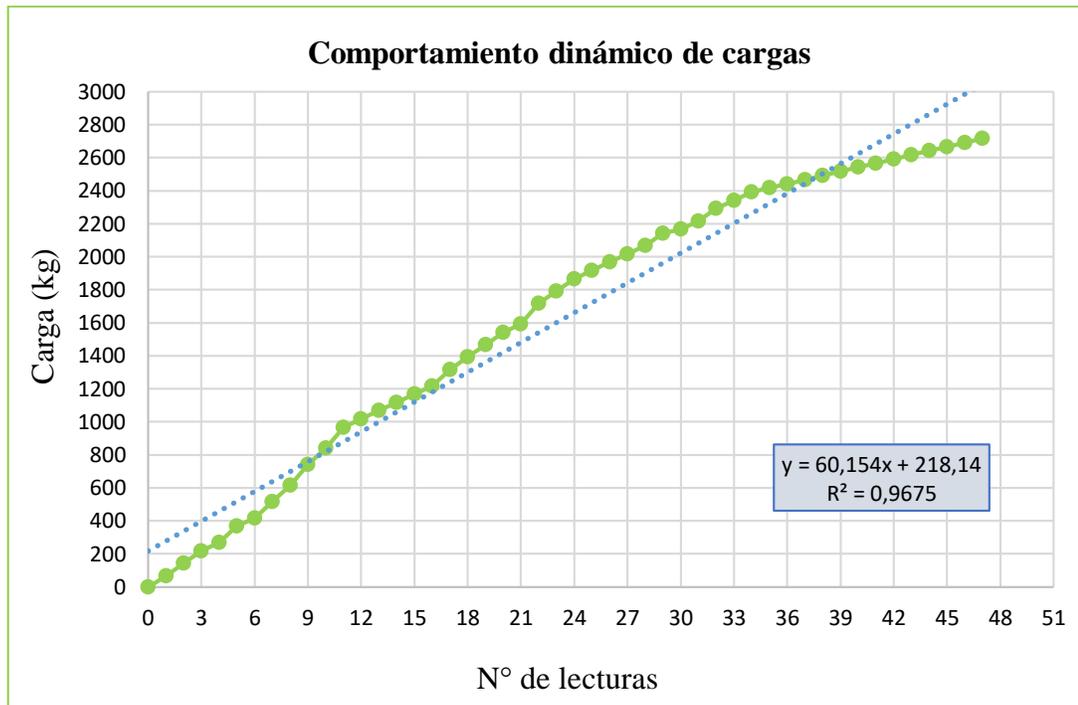
### Núcleo N°3

Tabla 3.108: Cargas (kg) tramo N°3 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	17	1217,000	33	2292,000
2	67,000	18	1317,000	34	2342,000
3	142,000	19	1392,000	35	2392,000
4	217,000	20	1467,000	36	2417,000
5	267,000	21	1542,000	37	2442,000
6	367,000	22	1592,000	38	2467,000
7	417,000	23	1717,000	39	2492,000
8	517,000	24	1792,000	40	2517,000
9	617,000	25	1867,000	41	2542,000
10	742,000	26	1917,000	42	2567,000
11	842,000	27	1967,000	43	2592,000
12	967,000	28	2017,000	44	2617,000
13	1017,000	29	2067,000	45	2642,000
14	1067,000	30	2142,000	46	2667,000
15	1117,000	31	2167,000	47	2692,000
16	1167,000	32	2217,000	48	2717,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.135: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 3 - núcleo N°3



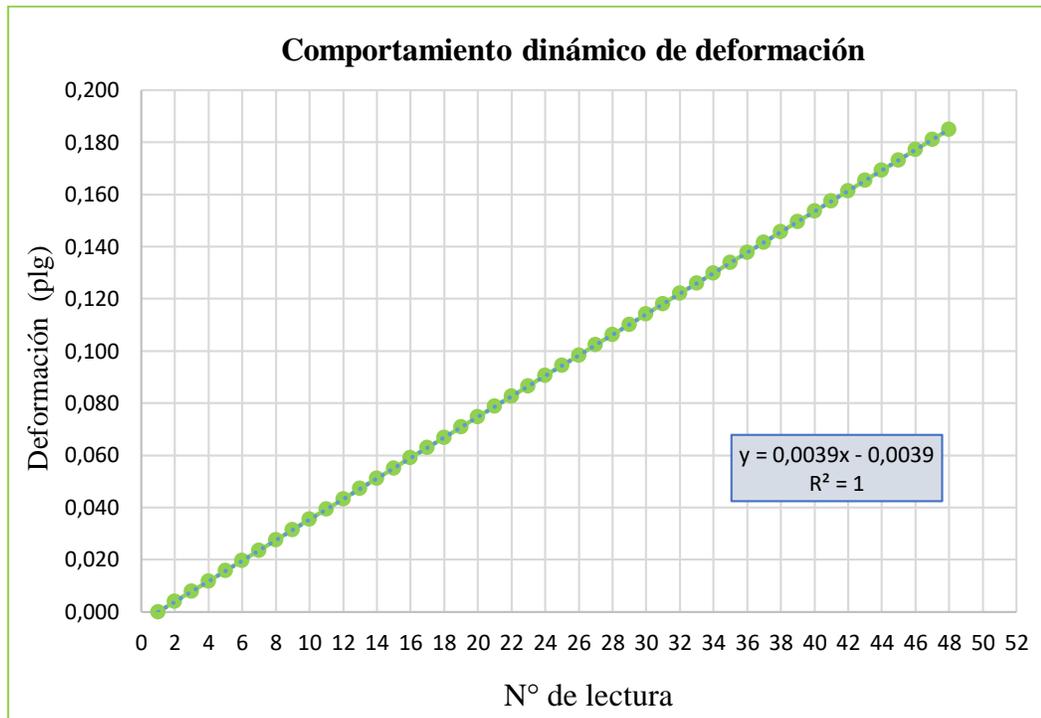
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.109: Deformación (plg) tramo N°3 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	17	0,063	33	0,126
2	0,004	18	0,067	34	0,130
3	0,008	19	0,071	35	0,134
4	0,012	20	0,075	36	0,138
5	0,016	21	0,079	37	0,142
6	0,020	22	0,083	38	0,146
7	0,024	23	0,087	39	0,150
8	0,028	24	0,091	40	0,154
9	0,031	25	0,094	41	0,157
10	0,035	26	0,098	42	0,161
11	0,039	27	0,102	43	0,165
12	0,043	28	0,106	44	0,169
13	0,047	29	0,110	45	0,173
14	0,051	30	0,114	46	0,177
15	0,055	31	0,118	47	0,181
16	0,059	32	0,122	48	0,185

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.136: Deformación vs N° de lecturas tramo N°3 - nucleó N°3



Fuente: Elaboración propia

Después de aplicar una carga constante al núcleo 3 podemos realizar el análisis donde se observa en la figura 3.135 que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente; también se puede demostrar que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2717 kg con un desplazamiento de 0,185 plg.

En la figura 3.136 se observa de igual forma que la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal cuya carga máxima es de 0,185 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es el correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1385,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo calle Delio Echazú ninguno de estos llegó a la máxima deformación; donde la máxima deformación que se produce es de 0,20 plg, y la mínima es de 0,185 plg la cual depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

## Tramo N°4: calle Campero

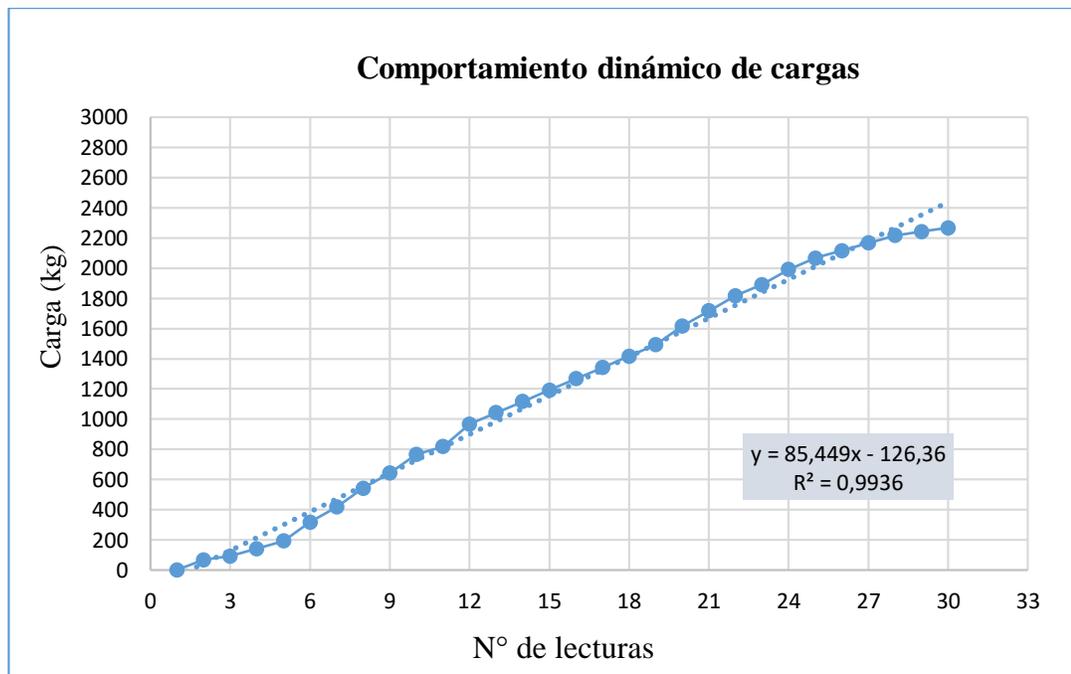
### Núcleo N°1

Tabla 3.110: Cargas (kg) tramo N°4 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	11	817,000	21	1717,000
2	67,000	12	967,000	22	1817,000
3	92,000	13	1042,000	23	1892,000
4	142,000	14	1117,000	24	1992,000
5	192,000	15	1192,000	25	2067,000
6	317,000	16	1267,000	26	2117,000
7	417,000	17	1342,000	27	2167,000
8	542,000	18	1417,000	28	2217,000
9	642,000	19	1492,000	29	2242,000
10	767,000	20	1617,000	30	2267,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.137: Cargas vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°1



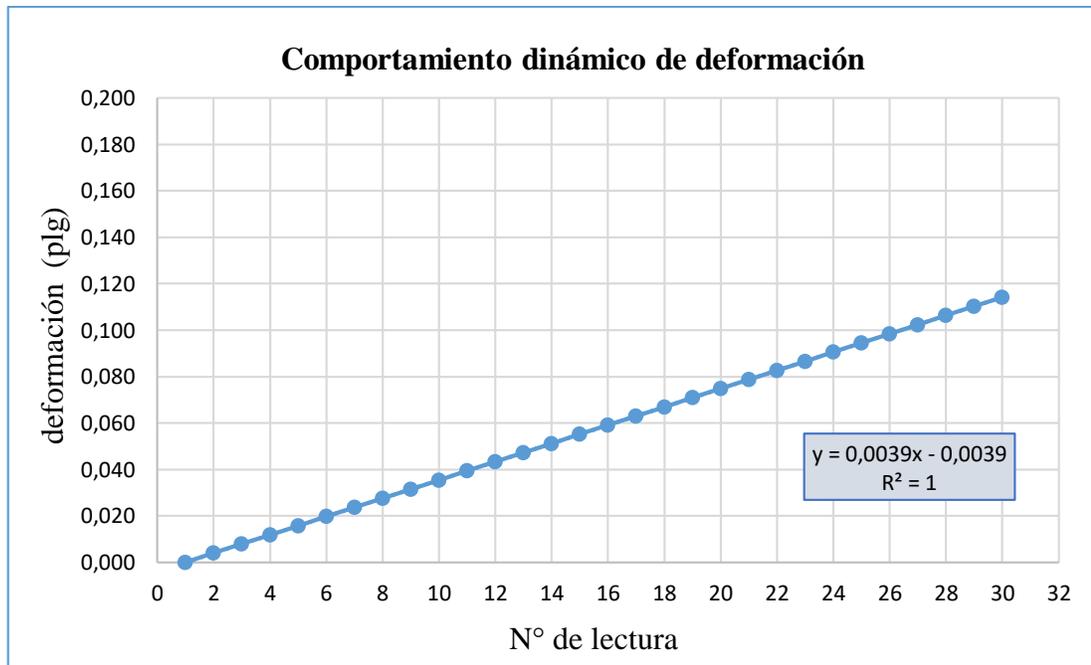
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.111: Deformación (plg) tramo N°4 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	11	0,039	21	0,079
2	0,004	12	0,043	22	0,083
3	0,008	13	0,047	23	0,087
4	0,012	14	0,051	24	0,091
5	0,016	15	0,055	25	0,094
6	0,020	16	0,059	26	0,098
7	0,024	17	0,063	27	0,102
8	0,028	18	0,067	28	0,106
9	0,031	19	0,071	29	0,110
10	0,035	20	0,075	30	0,114

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.138: Deformación vs N° de lecturas tramo N° 4 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis del núcleo 1 de la calle Campero que se representa en la figura 3.137 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2267 kg con un desplazamiento de 0,114 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,114 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1183,5 kg.

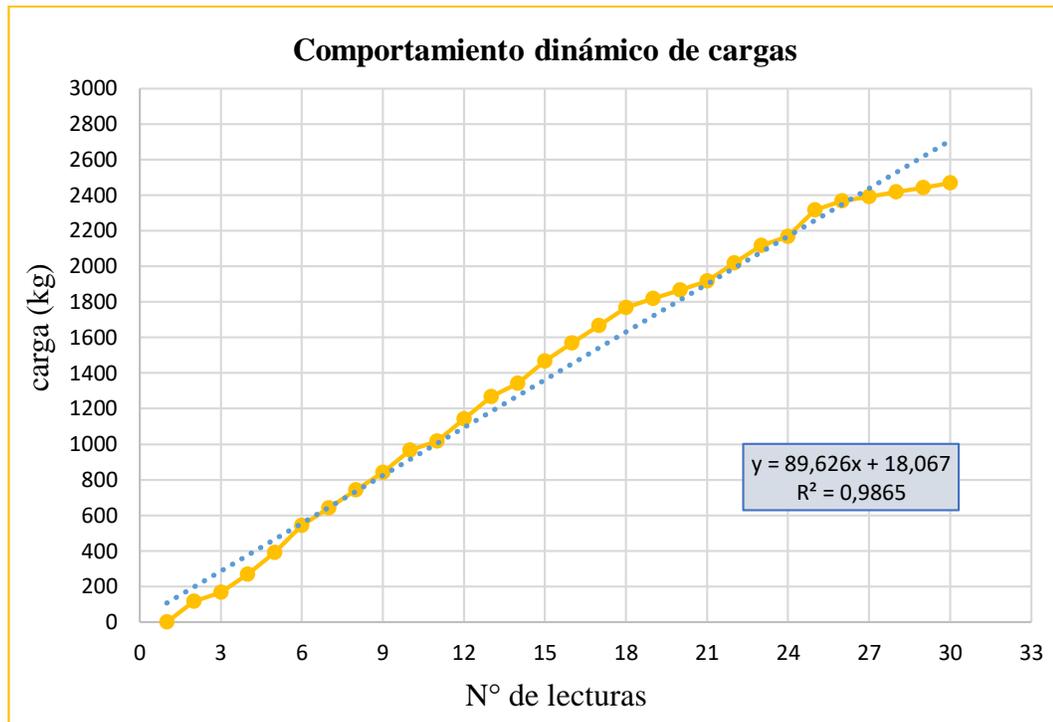
## Núcleo N°2

Tabla 3.112: Cargas (kg) tramo N°4 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	11	1017,000	21	1917,000
2	117,000	12	1142,000	22	2017,000
3	167,000	13	1267,000	23	2117,000
4	267,000	14	1342,000	24	2167,000
5	392,000	15	1467,000	25	2317,000
6	542,000	16	1567,000	26	2367,000
7	642,000	17	1667,000	27	2392,000
8	742,000	18	1767,000	28	2417,000
9	842,000	19	1817,000	29	2442,000
10	967,000	20	1867,000	30	2467,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.139: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 4 - núcleo N°2



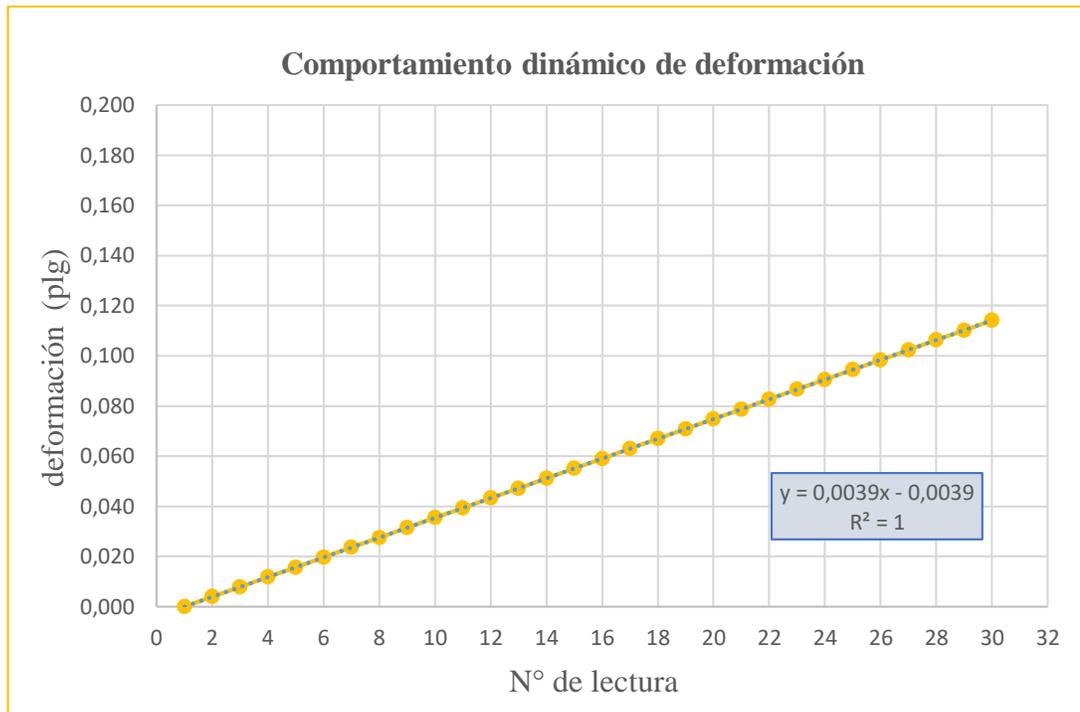
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.113: Deformación (plg) tramo N°4 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	11	0,039	21	0,079
2	0,004	12	0,043	22	0,083
3	0,008	13	0,047	23	0,087
4	0,012	14	0,051	24	0,091
5	0,016	15	0,055	25	0,094
6	0,020	16	0,059	26	0,098
7	0,024	17	0,063	27	0,102
8	0,028	18	0,067	28	0,106
9	0,031	19	0,071	29	0,110
10	0,035	20	0,075	30	0,114

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.140: Deformación vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Después de aplicar una carga constante al núcleo 2 que produce una deformación, en el análisis de la figura 3.139 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2467 Kg con un desplazamiento de 0,114 plg.

Así mismo la deformación presenta un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,114 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg es el correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1233 kg.

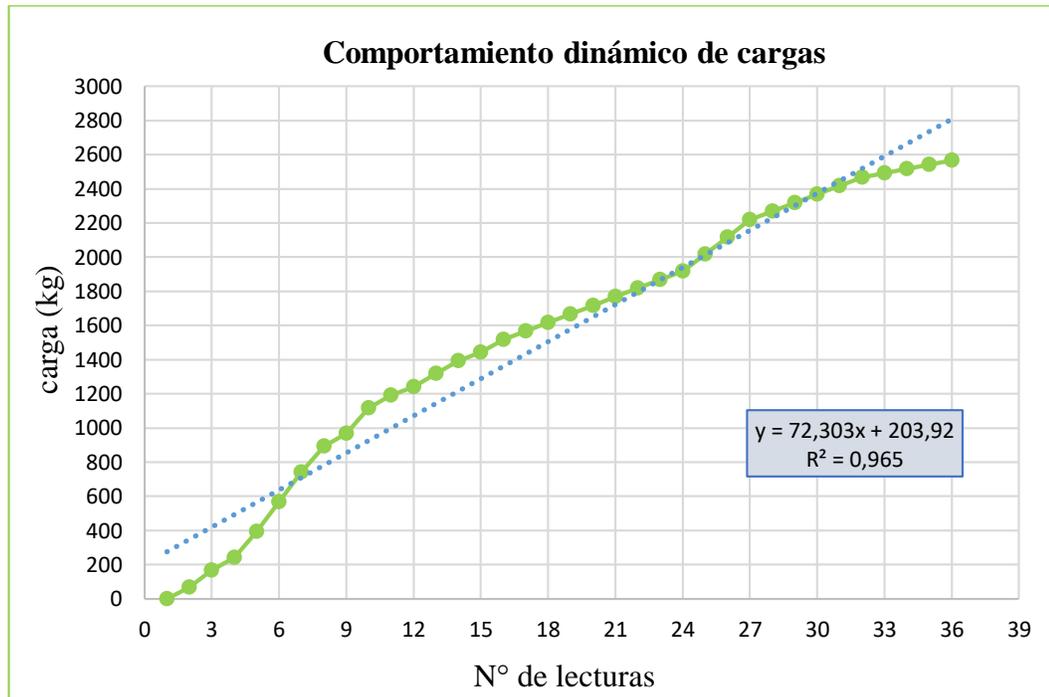
### Núcleo N°3

Tabla 3.114: Cargas (kg) tramo N°4 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	13	1317,000	25	2017,000
2	67,000	14	1392,000	26	2117,000
3	167,000	15	1442,000	27	2217,000
4	242,000	16	1517,000	28	2267,000
5	392,000	17	1567,000	29	2317,000
6	567,000	18	1617,000	30	2367,000
7	742,000	19	1667,000	31	2417,000
8	892,000	20	1717,000	32	2467,000
9	967,000	21	1767,000	33	2492,000
10	1117,000	22	1817,000	34	2517,000
11	1192,000	23	1867,000	35	2542,000
12	1242,000	24	1917,000	36	2567,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.141: Cargas vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°3



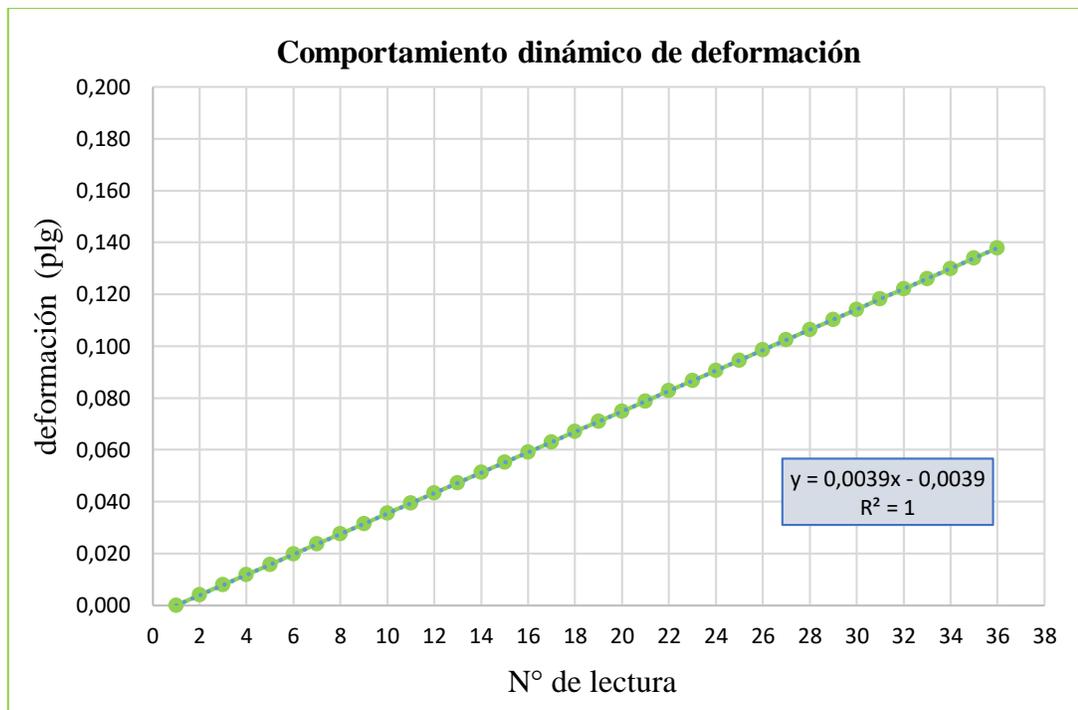
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.115: Deformación (plg) tramo N°4 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	13	0,047	25	0,094
2	0,004	14	0,051	26	0,098
3	0,008	15	0,055	27	0,102
4	0,012	16	0,059	28	0,106
5	0,016	17	0,063	29	0,110
6	0,020	18	0,067	30	0,114
7	0,024	19	0,071	31	0,118
8	0,028	20	0,075	32	0,122
9	0,031	21	0,079	33	0,126
10	0,035	22	0,083	34	0,130
11	0,039	23	0,087	35	0,134
12	0,043	24	0,091	36	0,138

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.142: Deformación vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Analizando la figura 3.141 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, que demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2467 kg con un desplazamiento de 0,138 plg.

De la misma manera, la deformación presenta un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,138 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es el correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1283,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo calle Campero ninguno de estos núcleos llego a la máxima deformación de 0,20 plg, donde se presentó una deformación de 0,14 plg, y la mínima es de 0,114 plg de la cual depende la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

### **Tramo N°5: calle Bolívar**

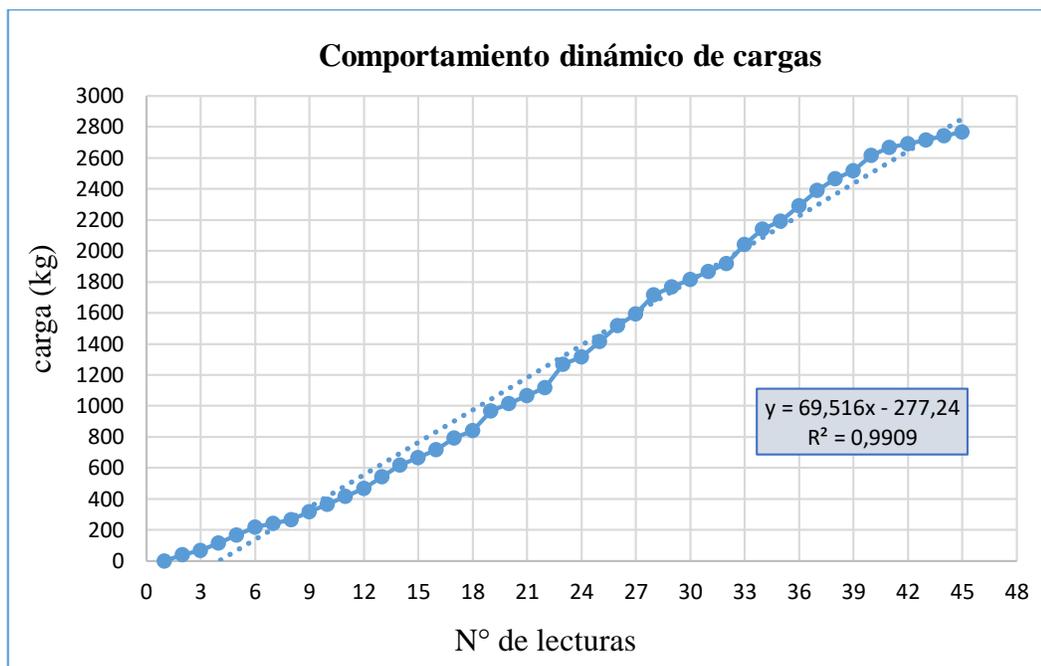
#### **Núcleo N°1**

Tabla 3.116: Cargas (kg) tramo N°5 - núcleo N°1

<b>N° de lecturas</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>N° de lecturas</b>	<b>Carga (kg)</b>	<b>N° de lecturas</b>	<b>Carga (kg)</b>
1	0,000	16	717,000	31	1867,000
2	42,000	17	792,000	32	1917,000
3	67,000	18	842,000	33	2042,000
4	117,000	19	967,000	34	2142,000
5	167,000	20	1017,000	35	2192,000
6	217,000	21	1067,000	36	2292,000
7	242,000	22	1117,000	37	2392,000
8	267,000	23	1267,000	38	2467,000
9	317,000	24	1317,000	39	2517,000
10	367,000	25	1417,000	40	2617,000
11	417,000	26	1517,000	41	2667,000
12	467,000	27	1592,000	42	2692,000
13	542,000	28	1717,000	43	2717,000
14	617,000	29	1767,000	44	2742,000
15	667,000	30	1817,000	45	2767,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.143: Cargas vs N° de lecturas tramo N°5 - núcleo N°1



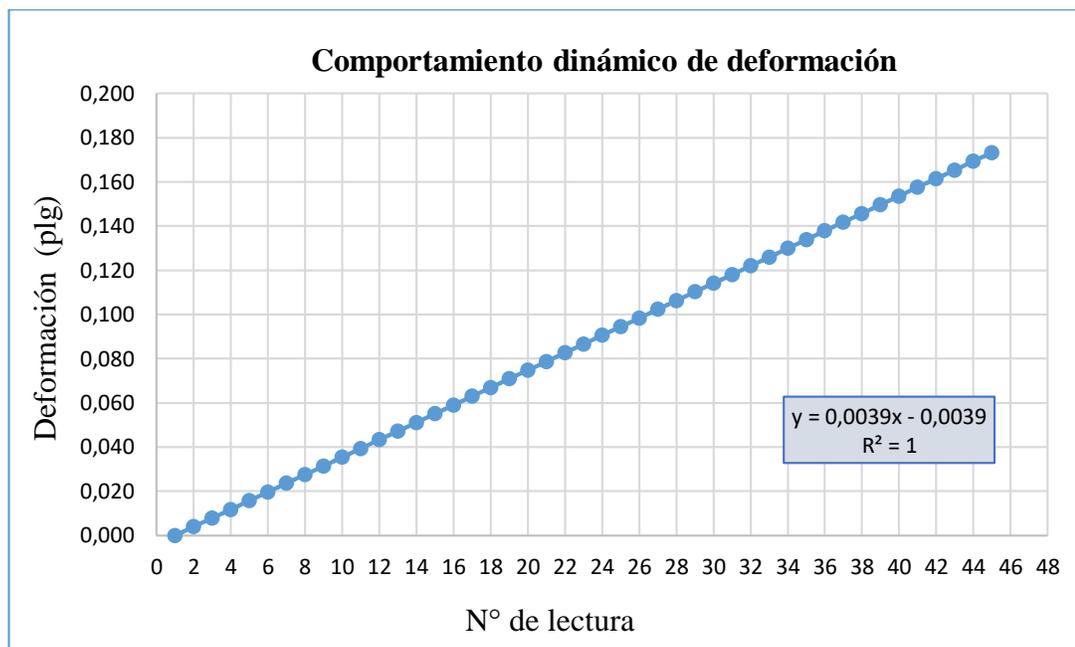
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.117: Deformación (plg) tramo N°5 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	16	0,059	31	0,118
2	0,004	17	0,063	32	0,122
3	0,008	18	0,067	33	0,126
4	0,012	19	0,071	34	0,130
5	0,016	20	0,075	35	0,134
6	0,020	21	0,079	36	0,138
7	0,024	22	0,083	37	0,142
8	0,028	23	0,087	38	0,146
9	0,031	24	0,091	39	0,150
10	0,035	25	0,094	40	0,154
11	0,039	26	0,098	41	0,157
12	0,043	27	0,102	42	0,161
13	0,047	28	0,106	43	0,165
14	0,051	29	0,110	44	0,169
15	0,055	30	0,114	45	0,173

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.144: Deformación vs N° de lecturas tramo N°5 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Después de aplicar la carga constante que produce una deformación al núcleo, en el análisis de la calle Bolívar en la figura 3.143 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2767 kg con un desplazamiento de 0,173 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,173 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1383,5 kg.

La deformación que se produce en una mezcla asfáltica depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

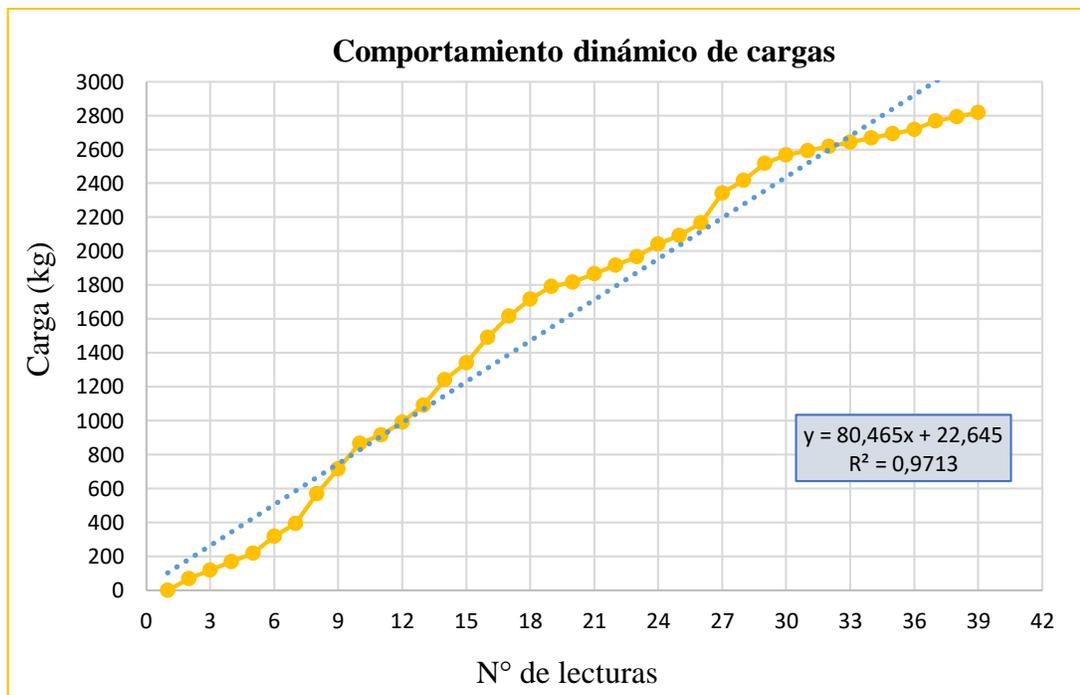
## Núcleo N°2

Tabla 3.118: Cargas (kg) tramo N°5 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	14	1242,000	27	2342,000
2	67,000	15	1342,000	28	2417,000
3	117,000	16	1492,000	29	2517,000
4	167,000	17	1617,000	30	2567,000
5	217,000	18	1717,000	31	2592,000
6	317,000	19	1792,000	32	2617,000
7	392,000	20	1817,000	33	2642,000
8	567,000	21	1867,000	34	2667,000
9	717,000	22	1917,000	35	2692,000
10	867,000	23	1967,000	36	2717,000
11	917,000	24	2042,000	37	2767,000
12	992,000	25	2092,000	38	2792,000
13	1092,000	26	2167,000	39	2817,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.145: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 5 - núcleo N°2



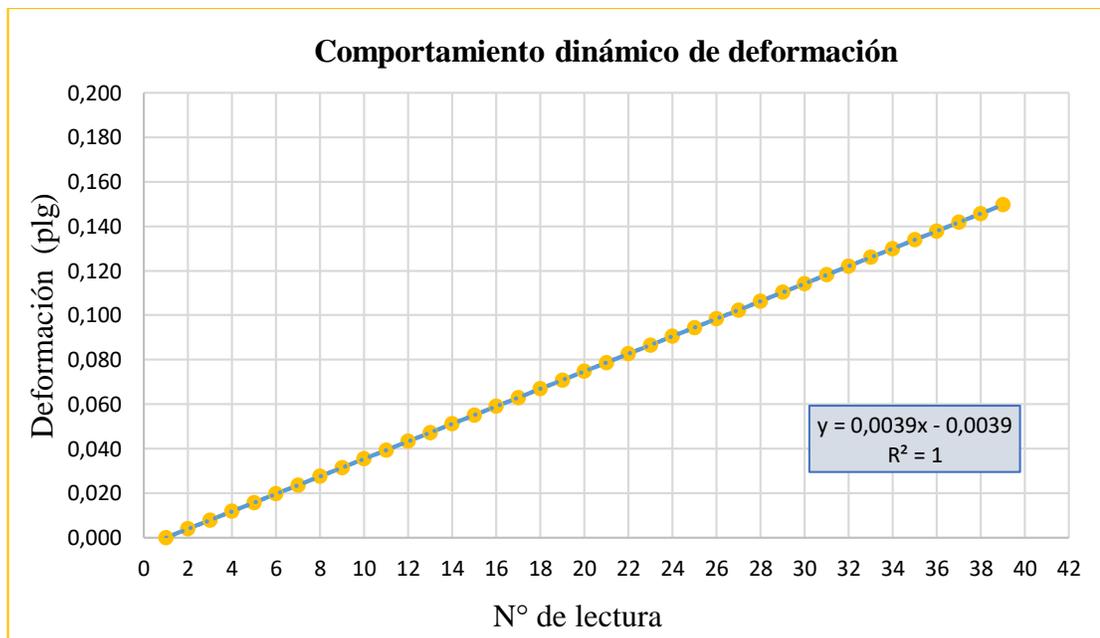
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.119: Deformación (plg) tramo N°5 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	14	0,051	27	0,102
2	0,004	15	0,055	28	0,106
3	0,008	16	0,059	29	0,110
4	0,012	17	0,063	30	0,114
5	0,016	18	0,067	31	0,118
6	0,020	19	0,071	32	0,122
7	0,024	20	0,075	33	0,126
8	0,028	21	0,079	34	0,130
9	0,031	22	0,083	35	0,134
10	0,035	23	0,087	36	0,138
11	0,039	24	0,091	37	0,142
12	0,043	25	0,094	38	0,146
13	0,047	26	0,098	39	0,150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.146: Deformación vs N° de lecturas tramo N° 5 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Aplicando la carga constante que produce una deformación podemos realizar el siguiente análisis, la figura 3.145 tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2817 kg con un desplazamiento de 0,15 plg.

En la figura 3.146 donde tiene un comportamiento de tendencia lineal; la deformación a la carga máxima es de 0,15 plg. a la cual la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir tiene una carga de 1408,5 kg.

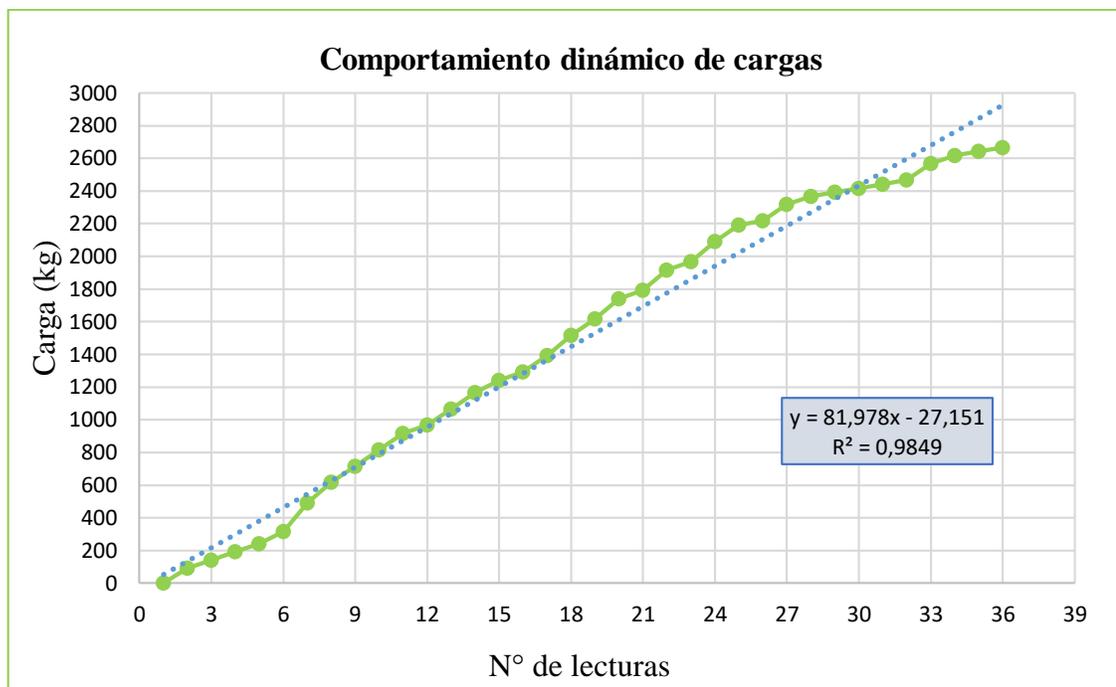
### Núcleo N°3

Tabla 3.120: Cargas (kg) tramo N°5 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	13	1067,000	25	2192,000
2	92,000	14	1167,000	26	2217,000
3	142,000	15	1242,000	27	2317,000
4	192,000	16	1292,000	28	2367,000
5	242,000	17	1392,000	29	2392,000
6	317,000	18	1517,000	30	2417,000
7	492,000	19	1617,000	31	2442,000
8	617,000	20	1742,000	32	2467,000
9	717,000	21	1792,000	33	2567,000
10	817,000	22	1917,000	34	2617,000
11	917,000	23	1967,000	35	2642,000
12	967,000	24	2092,000	36	2667,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.147: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 5 - núcleo N°3



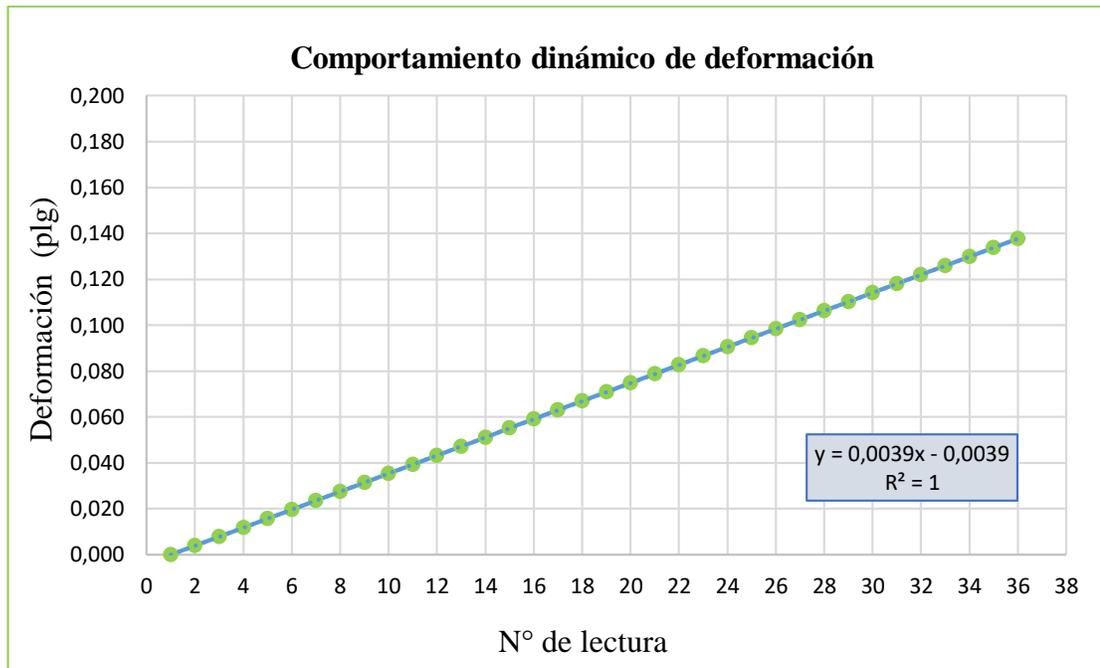
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.121: Deformación (plg) tramo N°5 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	13	0,047	25	0,094
2	0,004	14	0,051	26	0,098
3	0,008	15	0,055	27	0,102
4	0,012	16	0,059	28	0,106
5	0,016	17	0,063	29	0,110
6	0,020	18	0,067	30	0,114
7	0,024	19	0,071	31	0,118
8	0,028	20	0,075	32	0,122
9	0,031	21	0,079	33	0,126
10	0,035	22	0,083	34	0,130
11	0,039	23	0,087	35	0,134
12	0,043	24	0,091	36	0,138

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.148: Deformación vs N° de lecturas tramo N°5 - núcleo N°3



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de la calle Bolívar en la figura 3.147 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2367 kg con un desplazamiento de 0,138 plg.

De la misma manera se comporta la deformación con tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,138 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1333,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo calle Bolívar la máxima deformación que se presentó es de 0,18 plg, y la mínima es de 0,14 plg, tomando en cuenta que depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

**Tramo N°6: calle O'connor**

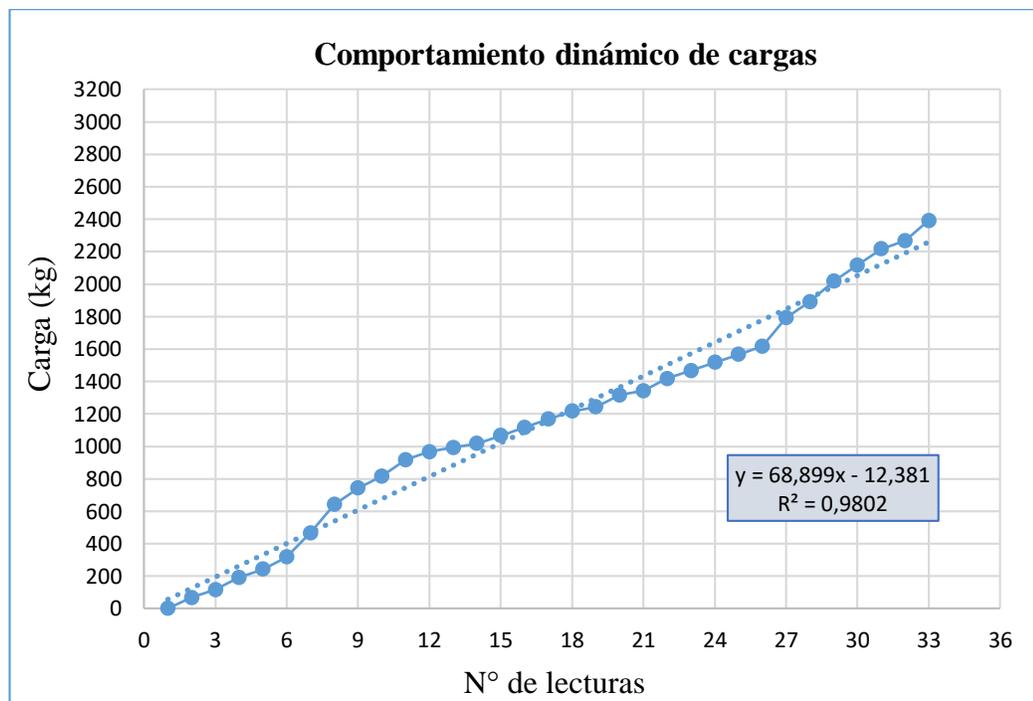
**Núcleo N°1**

Tabla 3.122: Cargas (kg) tramo N°6 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,00	12	967,00	23	1467,00
2	67,00	13	992,00	24	1517,00
3	117,00	14	1017,00	25	1567,00
4	192,00	15	1067,00	26	1617,00
5	242,00	16	1117,00	27	1792,00
6	317,00	17	1167,00	28	1892,00
7	467,00	18	1217,00	29	2017,00
8	642,00	19	1242,00	30	2117,00
9	742,00	20	1317,00	31	2217,00
10	817,00	21	1342,00	32	2267,00
11	917,00	22	1417,00	33	2392,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.149: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 6 - núcleo N°1



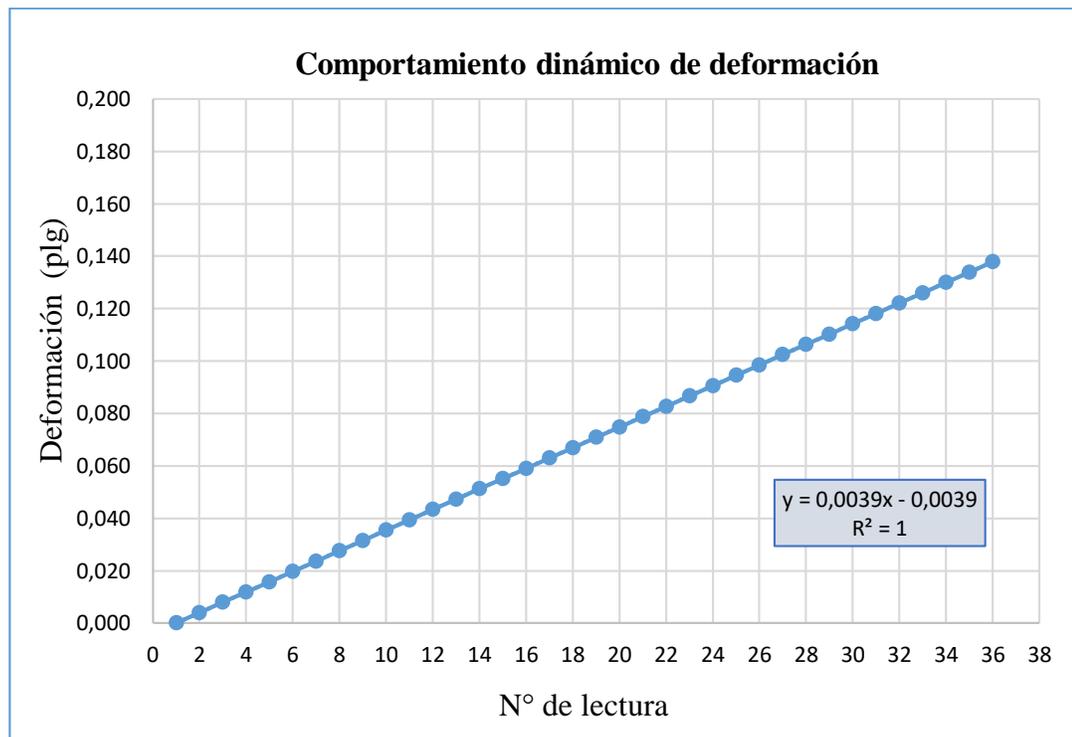
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.123: Deformación (plg) tramo N°6 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	12	0,043	23	0,087
2	0,004	13	0,047	24	0,091
3	0,008	14	0,051	25	0,094
4	0,012	15	0,055	26	0,098
5	0,016	16	0,059	27	0,102
6	0,020	17	0,063	28	0,106
7	0,024	18	0,067	29	0,110
8	0,028	19	0,071	30	0,114
9	0,031	20	0,075	31	0,118
10	0,035	21	0,079	32	0,122
11	0,039	22	0,083	33	0,126

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.150: Deformación vs N° de lecturas tramo N°6 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Después de aplicar la carga constante a través de la prensa CBR al núcleo 1 del tramo calle O'connor se produce una deformación de la cual se realizó el siguiente análisis.

Realizando el análisis de la calle O'connor de la figura 3.149 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que aumenta la deformación aumenta la carga obteniendo una carga máxima de 2392 kg con un desplazamiento de 0,126 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,126 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1196 kg.

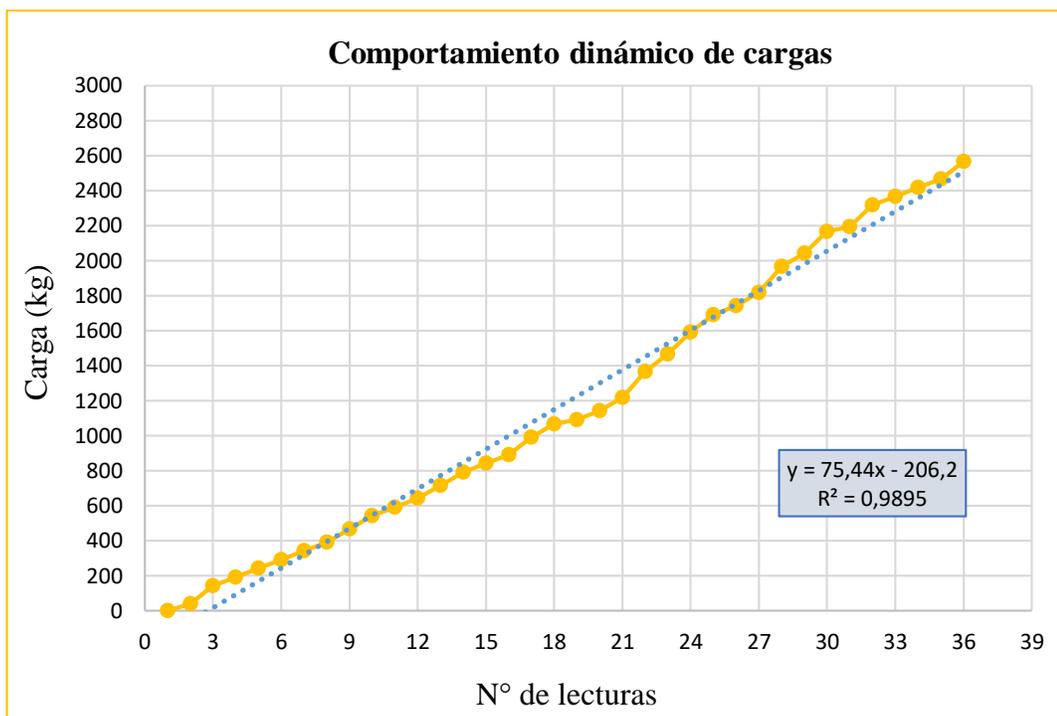
## Núcleo N°2

Tabla 3.124: Cargas (kg) tramo N°6 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,00	13	717,00	25	1692,00
2	42,00	14	792,00	26	1742,00
3	142,00	15	842,00	27	1817,00
4	192,00	16	892,00	28	1967,00
5	242,00	17	992,00	29	2042,00
6	292,00	18	1067,00	30	2167,00
7	342,00	19	1092,00	31	2192,00
8	392,00	20	1142,00	32	2317,00
9	467,00	21	1217,00	33	2367,00
10	542,00	22	1367,00	34	2417,00
11	592,00	23	1467,00	35	2467,00
12	642,00	24	1592,00	36	2567,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.151: Cargas vs N° de lecturas tramo N°6 - núcleo N°2



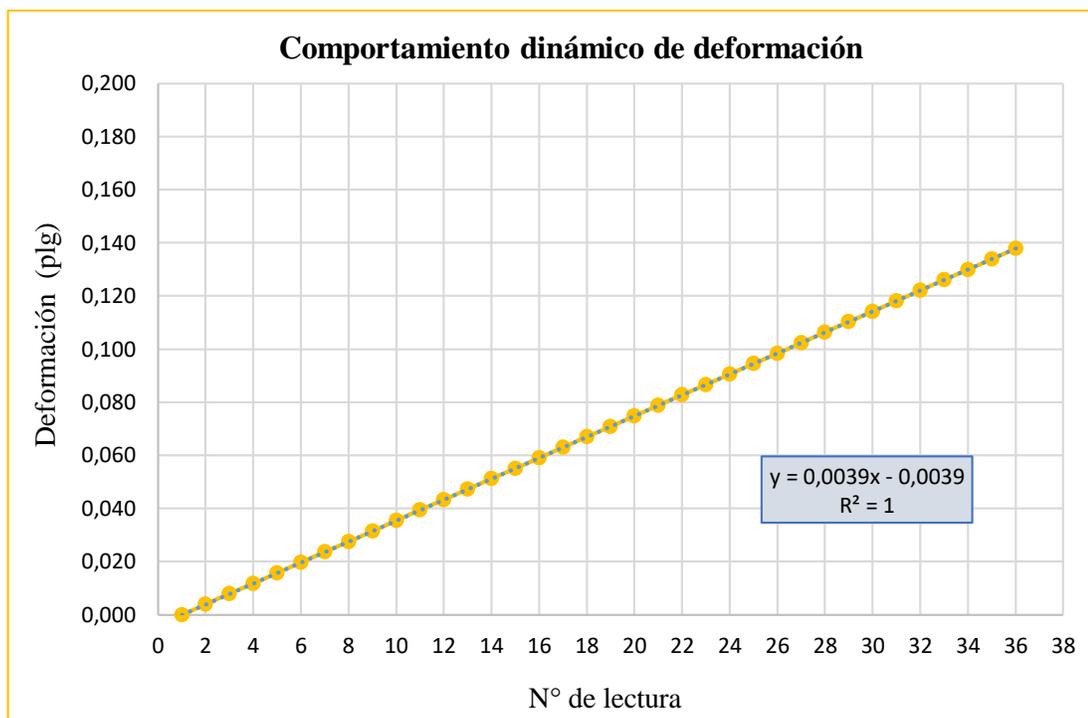
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.125: Deformación (plg) tramo N°6 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	13	0,047	25	0,094
2	0,004	14	0,051	26	0,098
3	0,008	15	0,055	27	0,102
4	0,012	16	0,059	28	0,106
5	0,016	17	0,063	29	0,110
6	0,020	18	0,067	30	0,114
7	0,024	19	0,071	31	0,118
8	0,028	20	0,075	32	0,122
9	0,031	21	0,079	33	0,126
10	0,035	22	0,083	34	0,130
11	0,039	23	0,087	35	0,134
12	0,043	24	0,091	36	0,138

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.152: Deformación vs N° de lecturas tramo N°6 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Después de aplicar la carga constante al núcleo 1 del tramo calle O'connor se produce una deformación de la cual se realizó el siguiente análisis.

Realizando el análisis de la figura 3.151 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde demuestra que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2567 kg. con un desplazamiento de 0,138 plg.

De la misma manera la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,138 plg. sabiendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1283,5 kg.

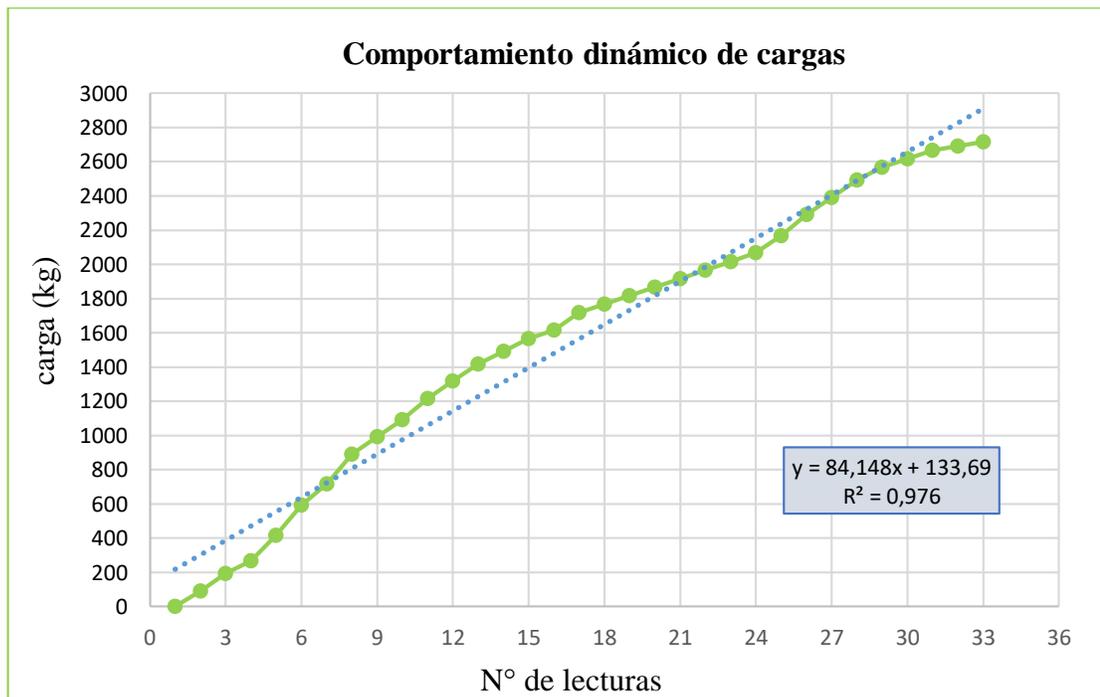
Núcleo N°3

Tabla 3.126: Cargas (kg) tramo N°6 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,00	12	1317,00	23	2017,00
2	92,00	13	1417,00	24	2067,00
3	192,00	14	1492,00	25	2167,00
4	267,00	15	1567,00	26	2292,00
5	417,00	16	1617,00	27	2392,00
6	592,00	17	1717,00	28	2492,00
7	717,00	18	1767,00	29	2567,00
8	892,00	19	1817,00	30	2617,00
9	992,00	20	1867,00	31	2667,00
10	1092,00	21	1917,00	32	2692,00
11	1217,00	22	1967,00	33	2717,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.153: Cargas vs N° de lecturas tramo N°6 - núcleo N°3



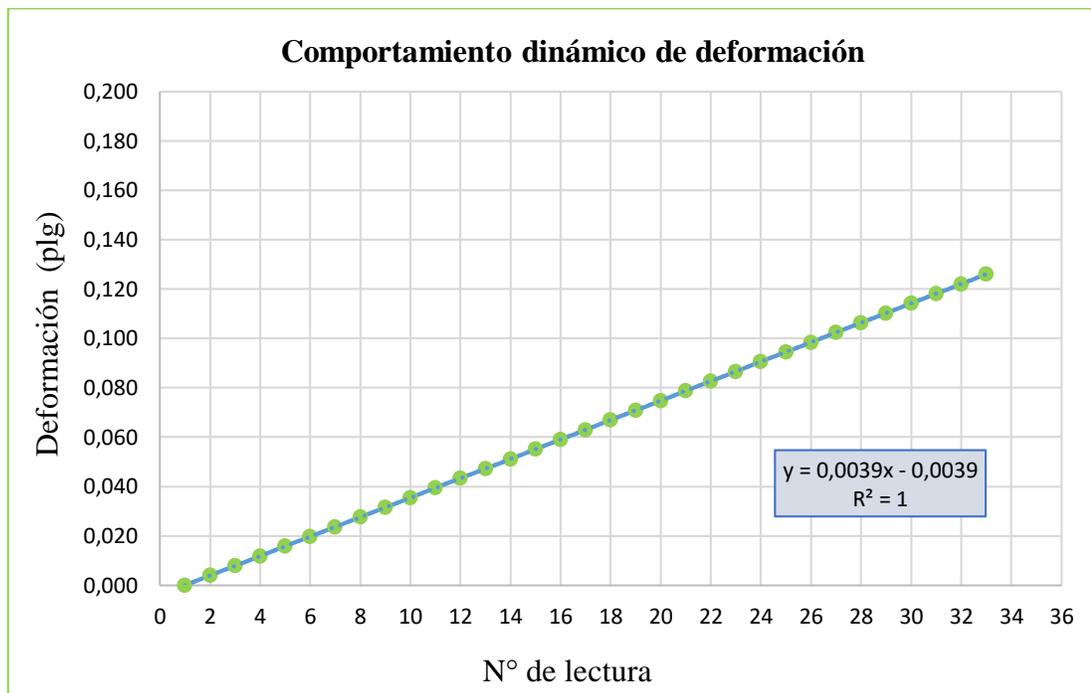
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.127: Deformación (plg) tramo N°6 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	12	0,043	23	0,087
2	0,004	13	0,047	24	0,091
3	0,008	14	0,051	25	0,094
4	0,012	15	0,055	26	0,098
5	0,016	16	0,059	27	0,102
6	0,020	17	0,063	28	0,106
7	0,024	18	0,067	29	0,110
8	0,028	19	0,071	30	0,114
9	0,031	20	0,075	31	0,118
10	0,035	21	0,079	32	0,122
11	0,039	22	0,083	33	0,126

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.154: Deformación vs N° de lecturas tramo N°6 - núcleo N°3



Fuente: Elaboración propia

Analizando la figura 3.153 se observa que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2717 kg. con un desplazamiento de 0,126 plg.

La deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,126 plg. sabiendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1358 kg.

De los tres núcleos obtenidos de este tramo calle la máxima deformación que se presentó es de 0,14 plg, y la mínima es de 0,126 plg, tomando en cuenta que depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

### 3.5.3.2. Núcleos extraídos de tramos de SEDECA

#### Tramo N°1: Tarija - Puerta Chaco

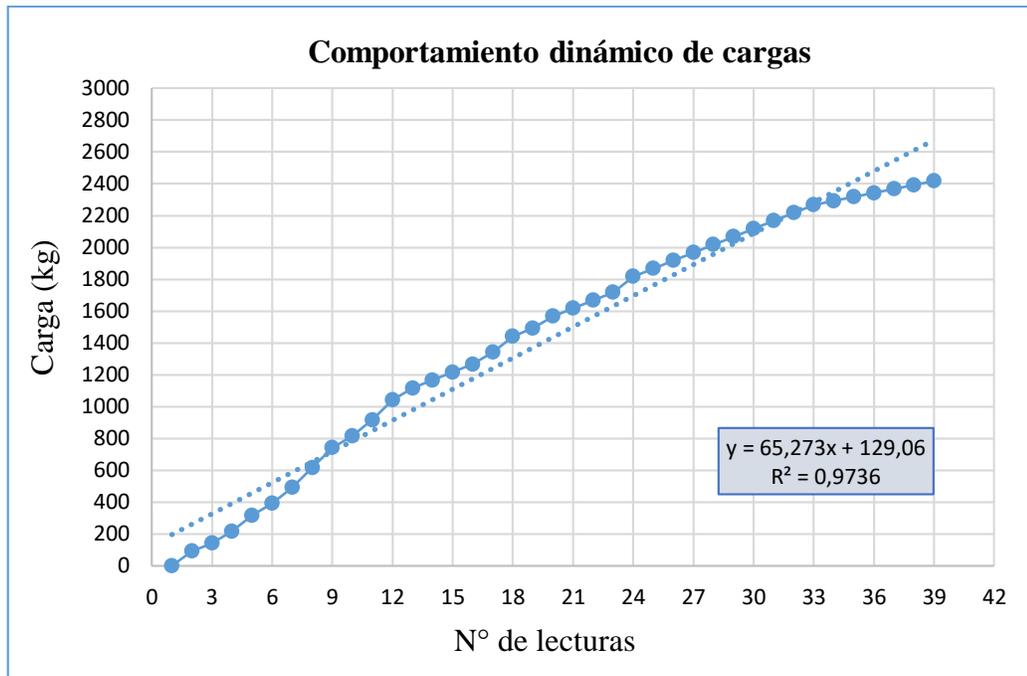
#### Núcleo N°1

Tabla 3.128: Cargas (kg) tramo N°1- núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,00	14	1167,00	27	1967,00
2	92,00	15	1217,00	28	2017,00
3	142,00	16	1267,00	29	2067,00
4	217,00	17	1342,00	30	2117,00
5	317,00	18	1442,00	31	2167,00
6	392,00	19	1492,00	32	2217,00
7	492,00	20	1567,00	33	2267,00
8	617,00	21	1617,00	34	2292,00
9	742,00	22	1667,00	35	2317,00
10	817,00	23	1717,00	36	2342,00
11	917,00	24	1817,00	37	2367,00
12	1042,00	25	1867,00	38	2392,00
13	1117,00	26	1917,00	39	2417,00

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.155: Cargas vs N° de lecturas tramo N°1 - Nucleó N°1



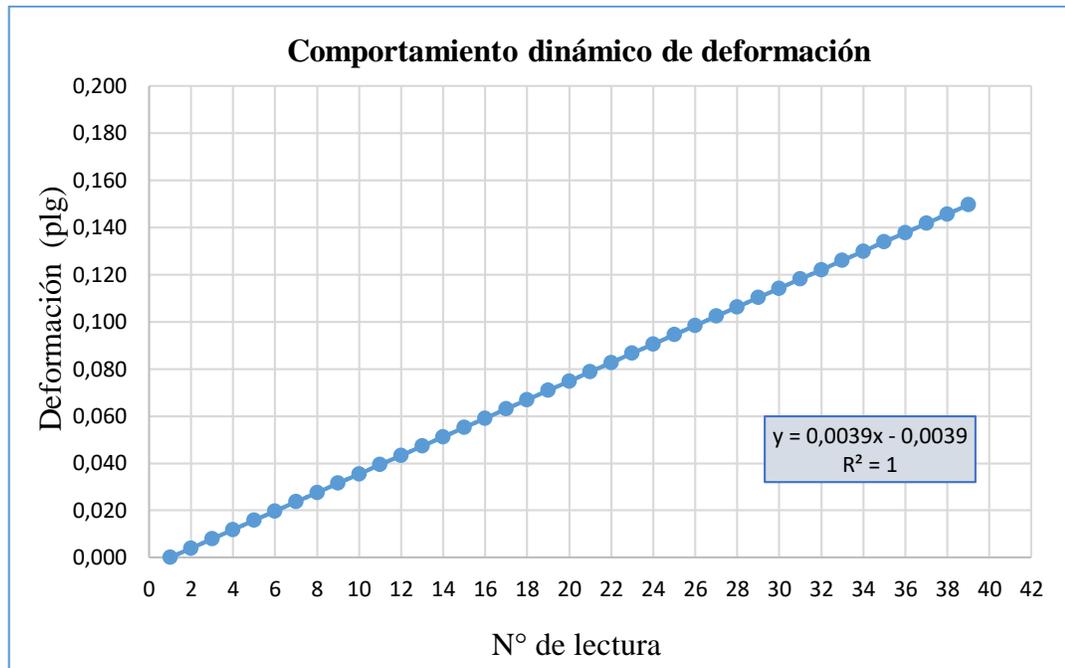
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.129: Deformación (plg) tramo N° 1 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	14	0,051	27	0,102
2	0,004	15	0,055	28	0,106
3	0,008	16	0,059	29	0,110
4	0,012	17	0,063	30	0,114
5	0,016	18	0,067	31	0,118
6	0,020	19	0,071	32	0,122
7	0,024	20	0,075	33	0,126
8	0,028	21	0,079	34	0,130
9	0,031	22	0,083	35	0,134
10	0,035	23	0,087	36	0,138
11	0,039	24	0,091	37	0,142
12	0,043	25	0,094	38	0,146
13	0,047	26	0,098	39	0,150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.156: Deformación vs N° de lecturas tramo N°1 - nucleó N°1



Fuente: Elaboración propia

De este ensayo realizado aplicando una carga constante donde se produce una deformación se hizo el siguiente análisis.

Realizando el análisis de Tarija - Puerta Chaco en la figura 3.155 podemos observar que tiene un comportamiento casi de tendencia lineal ascendente, y se puede demostrar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2417 kg. con un desplazamiento de 0,15 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,15 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1208,5 kg.

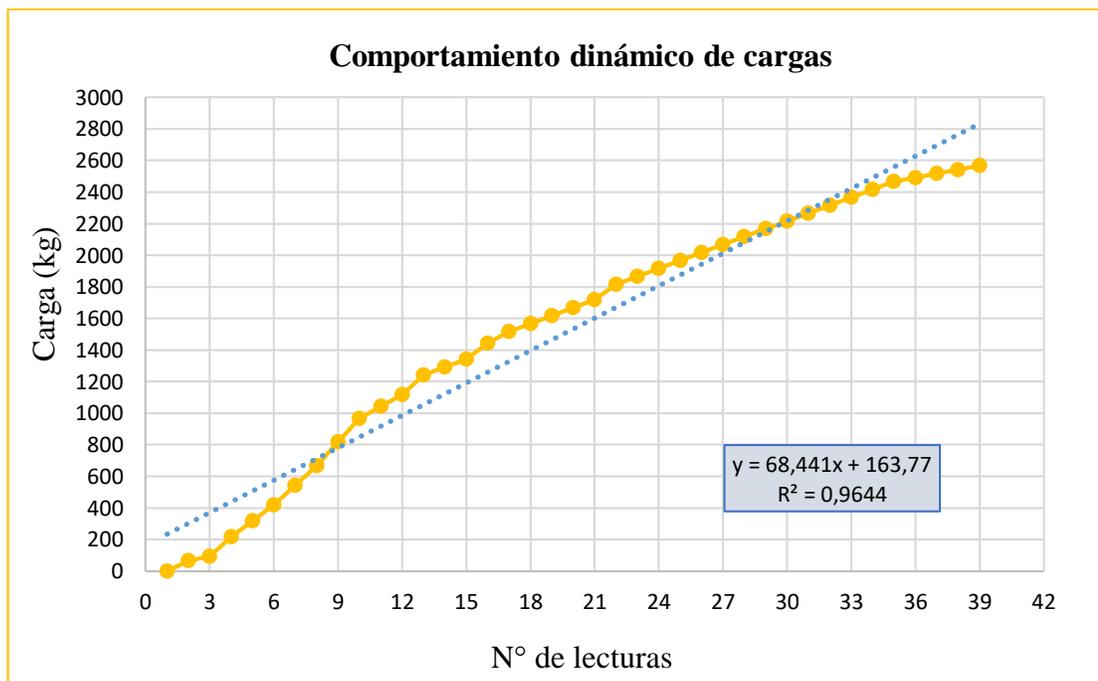
## Núcleo N°2

Tabla 3.130: Cargas (kg) tramo N°1 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	14	1292,000	27	2067,000
2	67,000	15	1342,000	28	2117,000
3	92,000	16	1442,000	29	2167,000
4	217,000	17	1517,000	30	2217,000
5	317,000	18	1567,000	31	2267,000
6	417,000	19	1617,000	32	2317,000
7	542,000	20	1667,000	33	2367,000
8	667,000	21	1717,000	34	2417,000
9	817,000	22	1817,000	35	2467,000
10	967,000	23	1867,000	36	2492,000
11	1042,000	24	1917,000	37	2517,000
12	1117,000	25	1967,000	38	2542,000
13	1242,000	26	2017,000	39	2567,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.157: Cargas vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°2



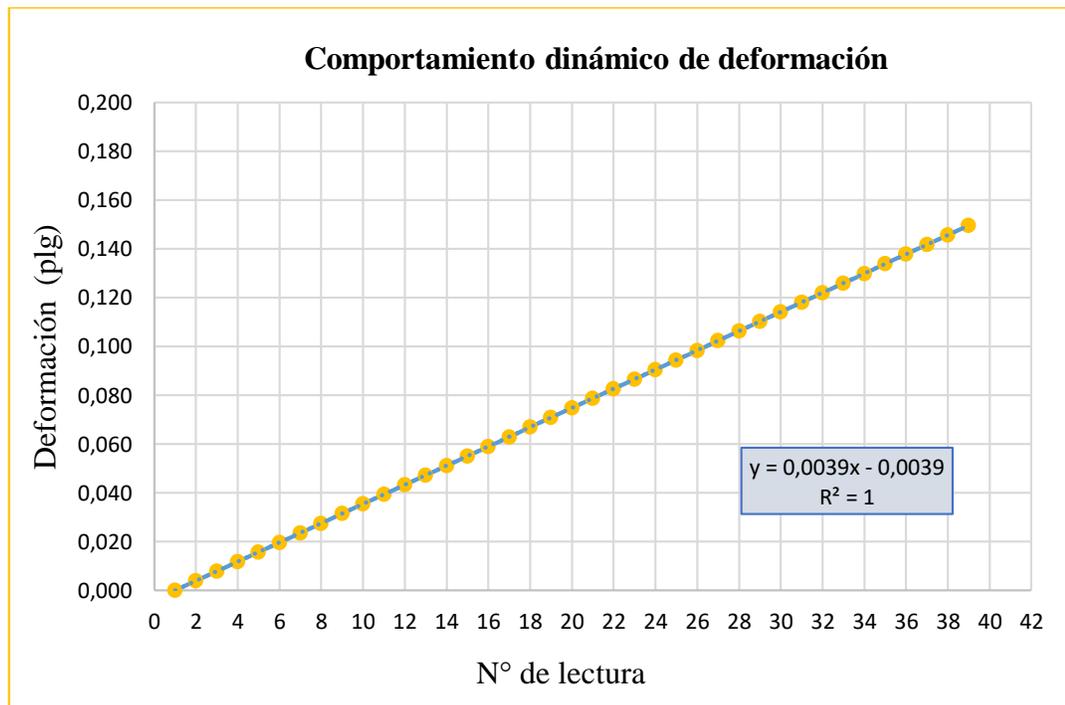
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.131: Deformación (plg) tramo N°1 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	14	0,051	27	0,102
2	0,004	15	0,055	28	0,106
3	0,008	16	0,059	29	0,110
4	0,012	17	0,063	30	0,114
5	0,016	18	0,067	31	0,118
6	0,020	19	0,071	32	0,122
7	0,024	20	0,075	33	0,126
8	0,028	21	0,079	34	0,130
9	0,031	22	0,083	35	0,134
10	0,035	23	0,087	36	0,138
11	0,039	24	0,091	37	0,142
12	0,043	25	0,094	38	0,146
13	0,047	26	0,098	39	0,150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.158: Deformación vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizado el análisis del núcleo 2 de la figura 3.157 podemos observar que tiene un comportamiento casi de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que incrementa la carga aumenta obteniendo una carga máxima de 2567 kg. con un desplazamiento de 0,15 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,15 plg. sabiendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1283,5 kg.

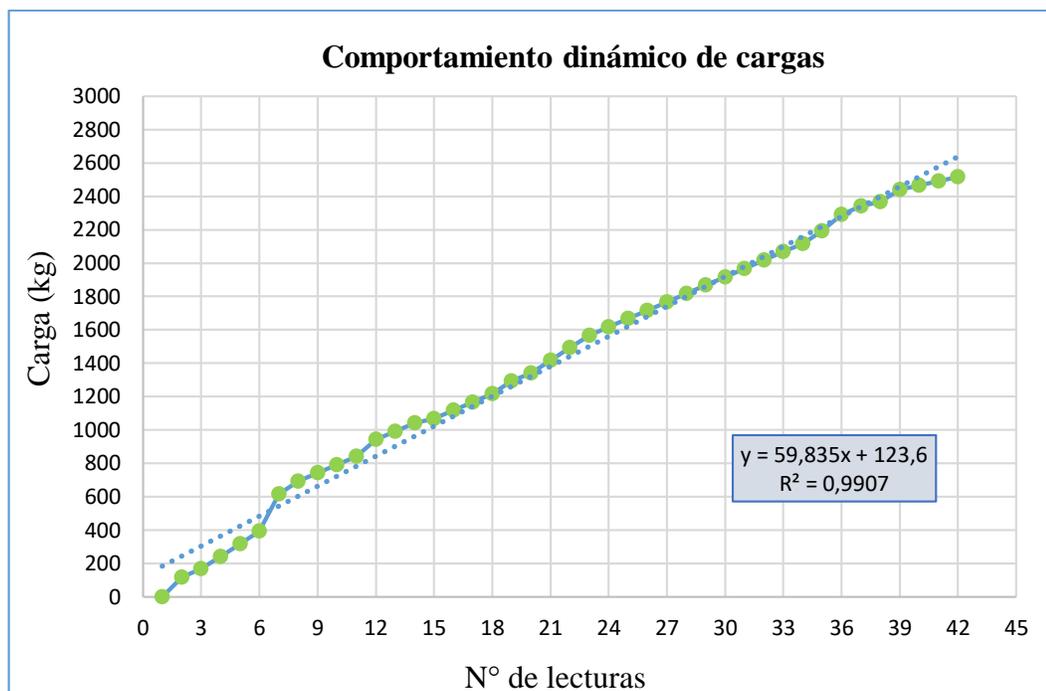
### Núcleo N°3

Tabla 3.132: Cargas (kg) tramo N°1 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	15	1067,000	29	1867,000
2	117,000	16	1117,000	30	1917,000
3	167,000	17	1167,000	31	1967,000
4	242,000	18	1217,000	32	2017,000
5	317,000	19	1292,000	33	2067,000
6	392,000	20	1342,000	34	2117,000
7	617,000	21	1417,000	35	2192,000
8	692,000	22	1492,000	36	2292,000
9	742,000	23	1567,000	37	2342,000
10	792,000	24	1617,000	38	2367,000
11	842,000	25	1667,000	39	2442,000
12	942,000	26	1717,000	40	2467,000
13	992,000	27	1767,000	41	2492,000
14	1042,00	28	1817,000	42	2517,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.159: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 1- núcleo N°3



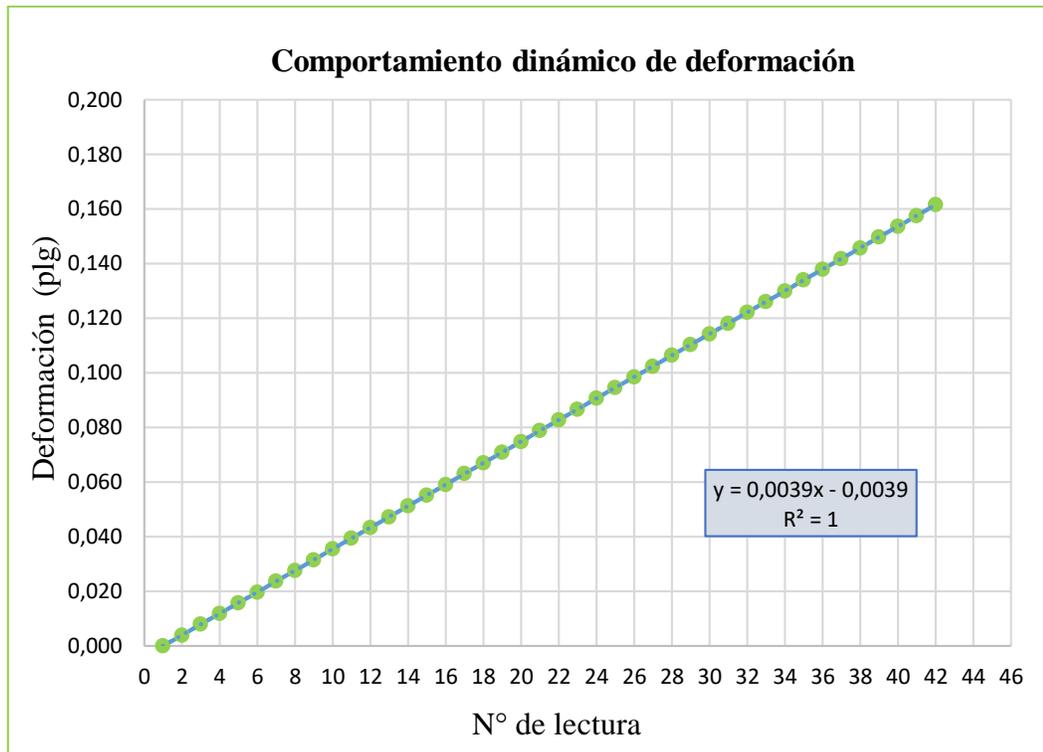
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.133: Deformación (plg) tramo N°1 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	15	0,055	29	0,110
2	0,004	16	0,059	30	0,114
3	0,008	17	0,063	31	0,118
4	0,012	18	0,067	32	0,122
5	0,016	19	0,071	33	0,126
6	0,020	20	0,075	34	0,130
7	0,024	21	0,079	35	0,134
8	0,028	22	0,083	36	0,138
9	0,031	23	0,087	37	0,142
10	0,035	24	0,091	38	0,146
11	0,039	25	0,094	39	0,150
12	0,043	26	0,098	40	0,154
13	0,047	27	0,102	41	0,157
14	0,051	28	0,106	42	0,161

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.160: Deformación vs N° de lecturas tramo N°1 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Analizando la figura 3.159 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2517 kg. con un desplazamiento de 0,161 plg.

La deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,161 plg. sabiendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir una carga de 1257 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo Tarija - Puerta el Chaco la máxima deformación que se presentó es de 0,16 plg, y la mínima es de 0,15 plg, tomando en cuenta que depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

## Tramo N°2: Puerta Chaco - Puente Jarcas

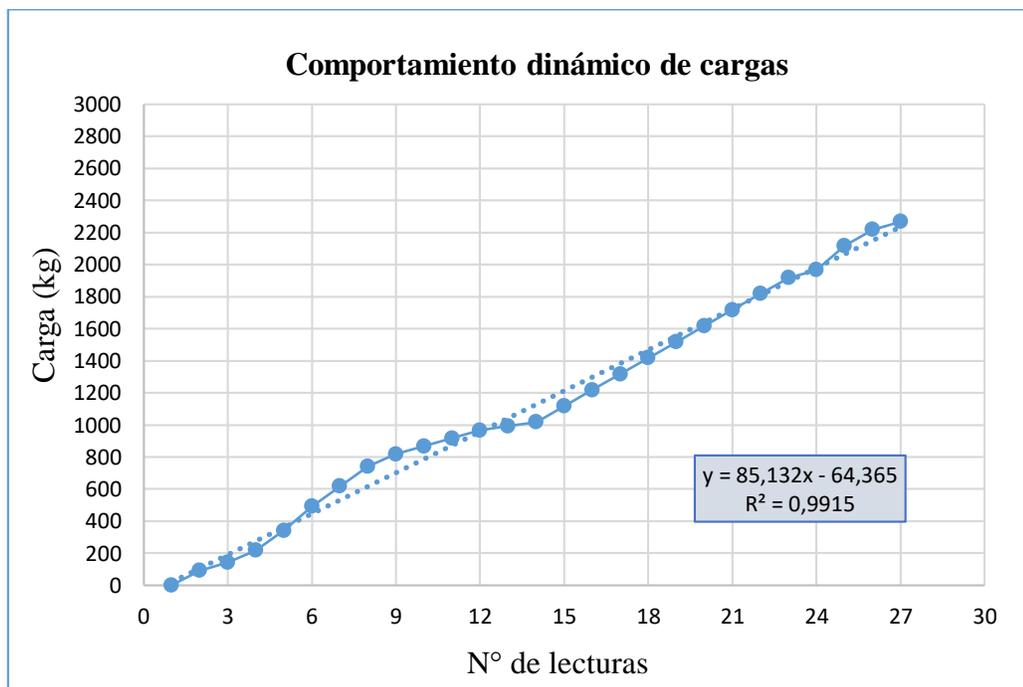
### Núcleo N°1

Tabla 3.134: Cargas (kg) tramo N°2 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	10	867,000	19	1517,000
2	92,000	11	917,000	20	1617,000
3	142,000	12	967,000	21	1717,000
4	217,000	13	992,000	22	1817,000
5	342,000	14	1017,000	23	1917,000
6	492,000	15	1117,000	24	1967,000
7	617,000	16	1217,000	25	2117,000
8	742,000	17	1317,000	26	2217,000
9	817,000	18	1417,000	27	2267,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.161: Cargas vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°1



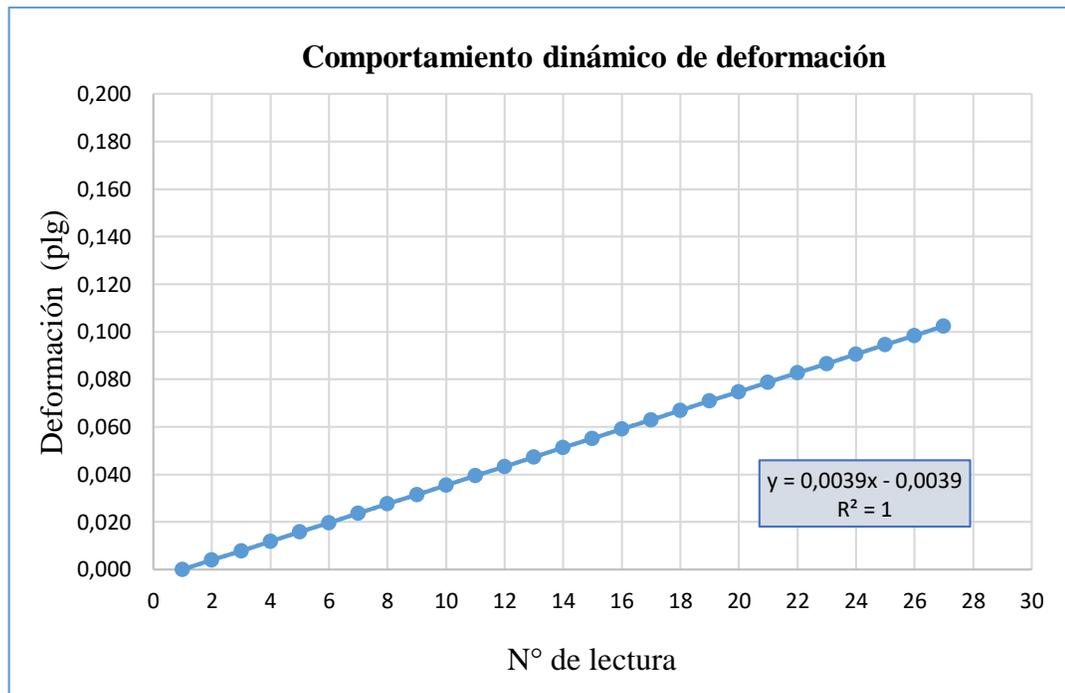
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.135: Deformación (plg) tramo N°2 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	10	0,035	19	0,071
2	0,004	11	0,039	20	0,075
3	0,008	12	0,043	21	0,079
4	0,012	13	0,047	22	0,083
5	0,016	14	0,051	23	0,087
6	0,020	15	0,055	24	0,091
7	0,024	16	0,059	25	0,094
8	0,028	17	0,063	26	0,098
9	0,031	18	0,067	27	0,102

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.162: Deformación vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Aplicando la carga constate al núcleo 1 del tramo Puerta Chaco - Puente Jarcas, se produce una deformación de la cual se obtiene el siguiente análisis.

Realizando el análisis de la figura 3.161 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2267 kg. con un desplazamiento de 0,102 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,102 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir con una carga de 1133,5 kg.

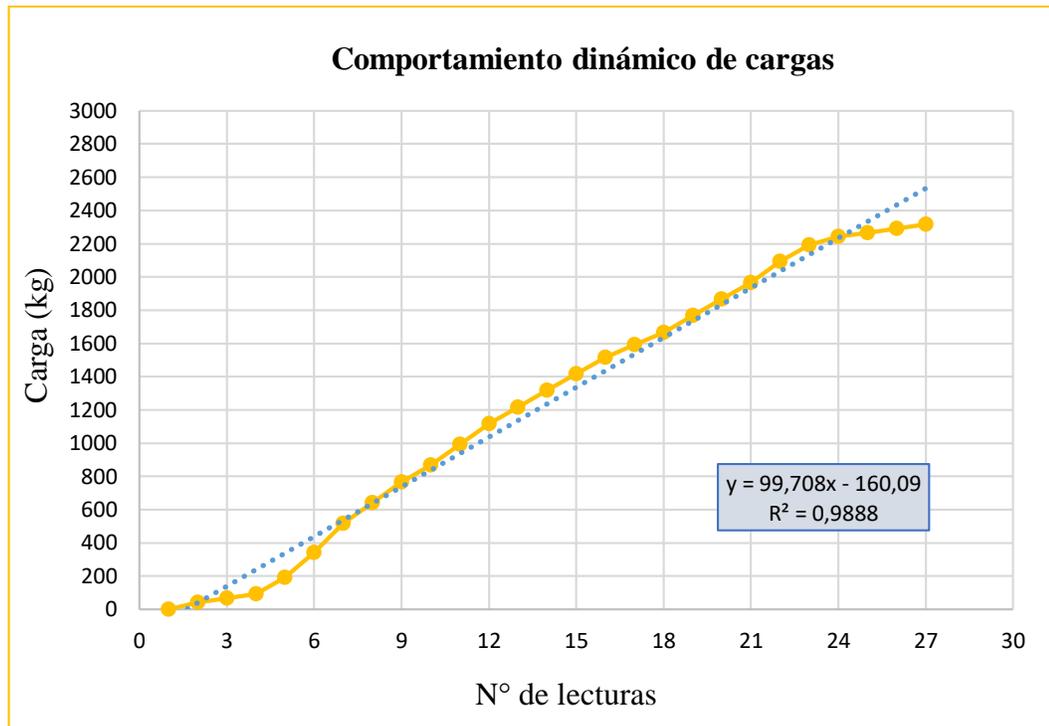
## Núcleo N°2

Tabla 3.136: Cargas (kg) tramo N°2 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	10	867,000	19	1767,000
2	42,000	11	992,000	20	1867,000
3	67,000	12	1117,000	21	1967,000
4	92,000	13	1217,000	22	2092,000
5	192,000	14	1317,000	23	2192,000
6	342,000	15	1417,000	24	2242,000
7	517,000	16	1517,000	25	2267,000
8	642,000	17	1592,000	26	2292,000
9	767,000	18	1667,000	27	2317,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.163: Cargas vs N° de lecturas tramo N° 2 - núcleo N°2



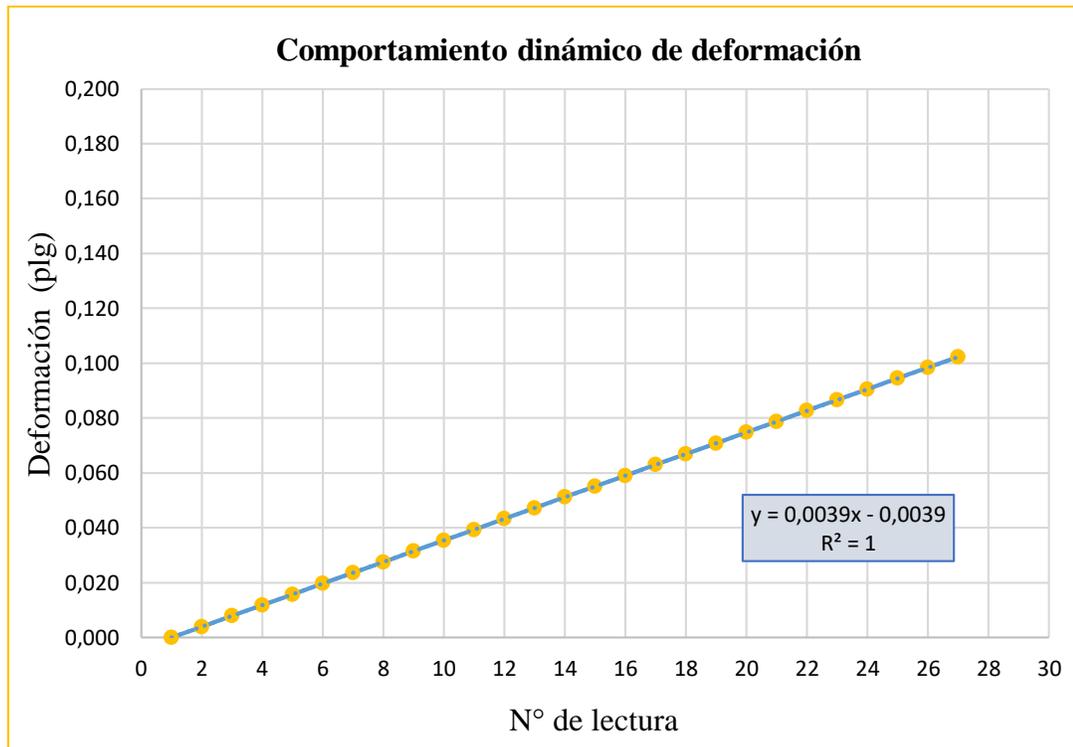
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.137: Deformación (plg) tramo N°2 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	10	0,035	19	0,071
2	0,004	11	0,039	20	0,075
3	0,008	12	0,043	21	0,079
4	0,012	13	0,047	22	0,083
5	0,016	14	0,051	23	0,087
6	0,020	15	0,055	24	0,091
7	0,024	16	0,059	25	0,094
8	0,028	17	0,063	26	0,098
9	0,031	18	0,067	27	0,102

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.164: Deformación vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de Puerta Chaco - Puente Jarcas, en la figura 3.163 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación, obteniendo una carga máxima de 2317 kg con un desplazamiento de 0,102 plg.

La deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,102 plg; siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es el correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir se tiene una carga de 1158,5 kg.

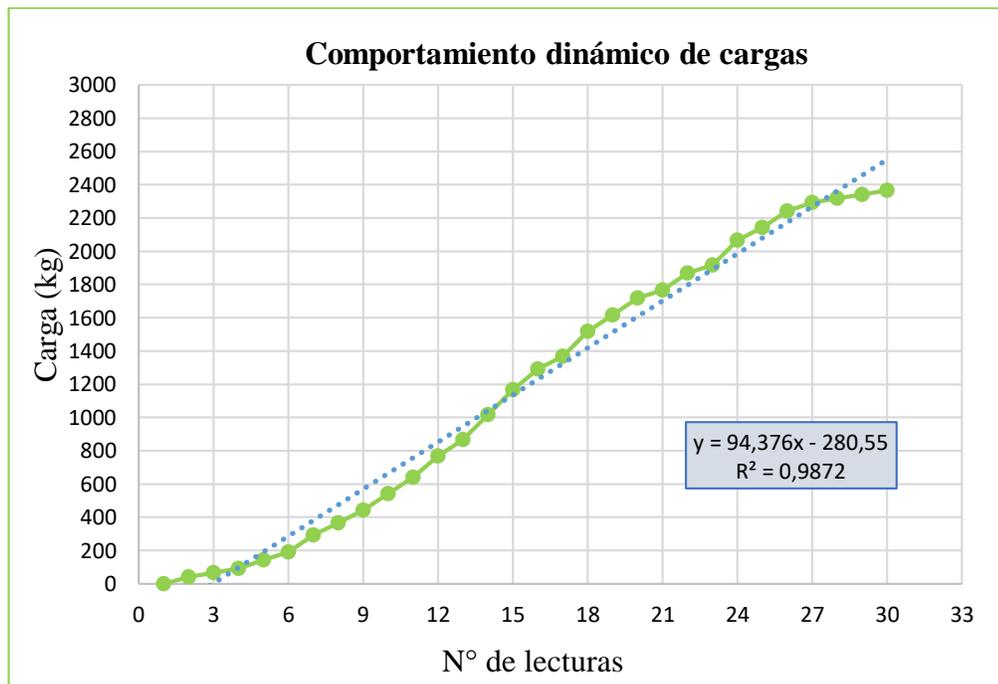
### Núcleo N°3

Tabla 3.138: Cargas (kg) tramo N°2 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	11	642,000	21	1767,000
2	42,000	12	767,000	22	1867,000
3	67,000	13	867,000	23	1917,000
4	92,000	14	1017,000	24	2067,000
5	142,000	15	1167,000	25	2142,000
6	192,000	16	1292,000	26	2242,000
7	292,000	17	1367,000	27	2292,000
8	367,000	18	1517,000	28	2317,000
9	442,000	19	1617,000	29	2342,000
10	542,000	20	1717,000	30	2367,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.165: Cargas vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°3



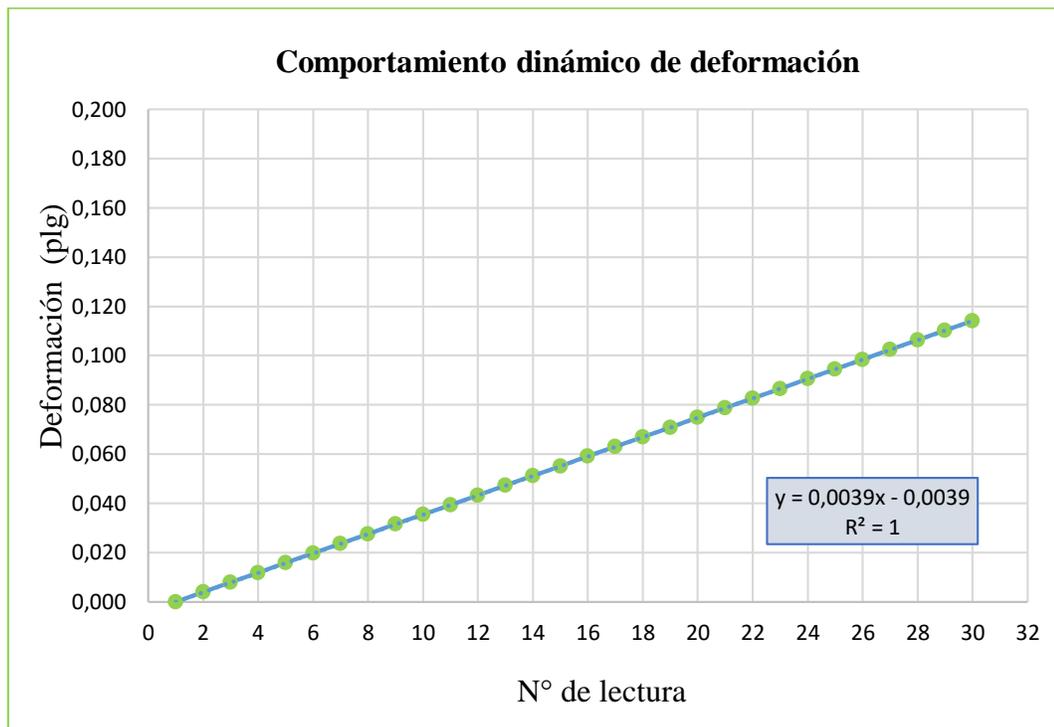
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.139: Deformación (plg) tramo N°2 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	11	0,039	21	0,079
2	0,004	12	0,043	22	0,083
3	0,008	13	0,047	23	0,087
4	0,012	14	0,051	24	0,091
5	0,016	15	0,055	25	0,094
6	0,020	16	0,059	26	0,098
7	0,024	17	0,063	27	0,102
8	0,028	18	0,067	28	0,106
9	0,031	19	0,071	29	0,110
10	0,035	20	0,075	30	0,114

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.166: Deformación vs N° de lecturas tramo N°2 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de la figura 3.165 se puede observar que tiene un comportamiento donde es casi de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2367 kg. con un desplazamiento de 0,114 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,114 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,10 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir la deformación al 50% es de 0,049 plg. con una carga de 1183,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo Puerta el chaco - Puente Jarcas la máxima deformación que se presentó es de 0,114 plg, y la mínima es de 0,102 plg, tomando en cuenta que depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

### Tramo N°3 Puente Jarcas - Piedra Larga

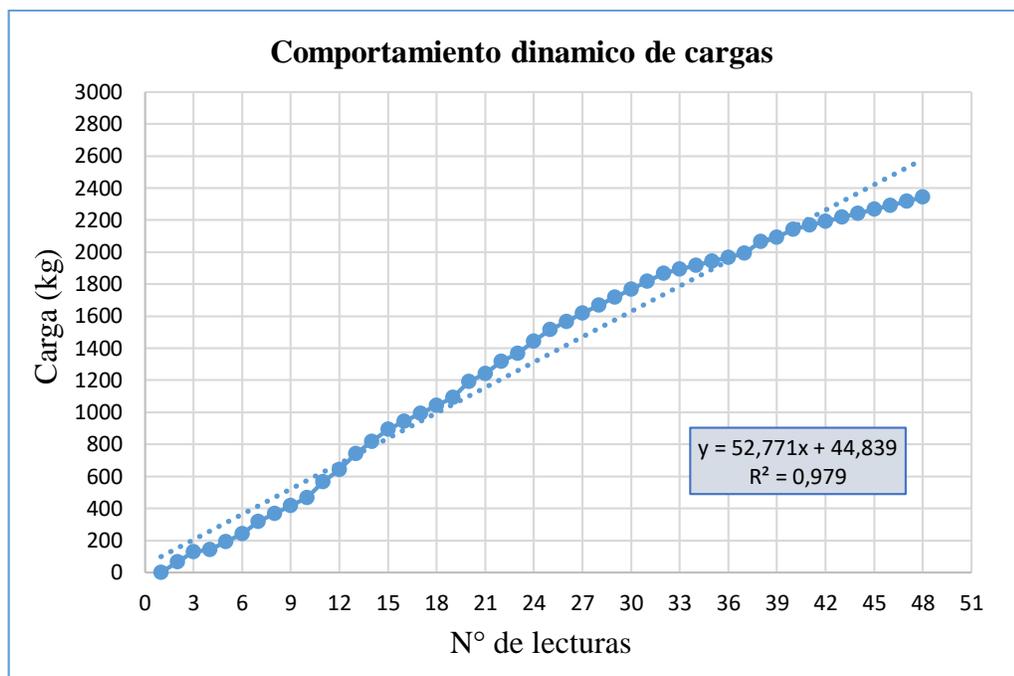
#### Núcleo N°1

Tabla 3.140: Deformación (plg) tramo N°2 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	17	992,000	33	1892,000
2	67,000	18	1042,000	34	1917,000
3	129,500	19	1092,000	35	1942,000
4	142,000	20	1192,000	36	1967,000
5	192,000	21	1242,000	37	1992,000
6	242,000	22	1317,000	38	2067,000
7	317,000	23	1367,000	39	2092,000
8	367,000	24	1442,000	40	2142,000
9	417,000	25	1517,000	41	2167,000
10	467,000	26	1567,000	42	2192,000
11	567,000	27	1617,000	43	2217,000
12	642,000	28	1667,000	44	2242,000
13	742,000	29	1717,000	45	2267,000
14	817,000	30	1767,000	46	2292,000
15	892,000	31	1817,000	47	2317,000
16	942,000	32	1867,000	48	2342,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.167: Cargas vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°1



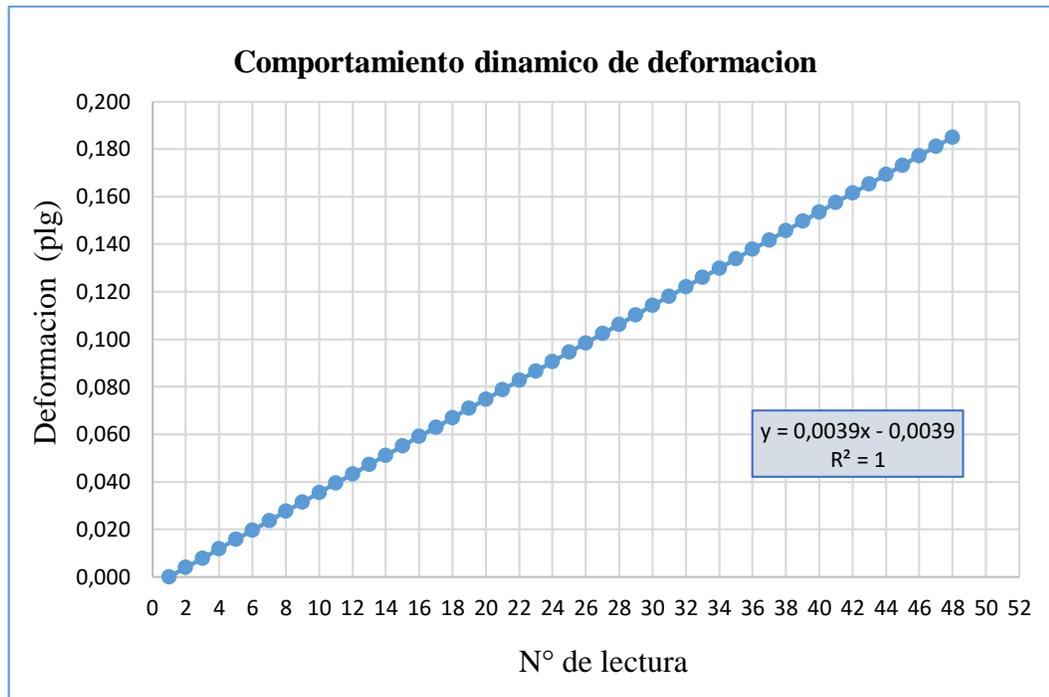
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.141: Deformación (plg) tramo N°3 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	17	0,063	33	0,126
2	0,004	18	0,067	34	0,130
3	0,008	19	0,071	35	0,134
4	0,012	20	0,075	36	0,138
5	0,016	21	0,079	37	0,142
6	0,020	22	0,083	38	0,146
7	0,024	23	0,087	39	0,150
8	0,028	24	0,091	40	0,154
9	0,031	25	0,094	41	0,157
10	0,035	26	0,098	42	0,161
11	0,039	27	0,102	43	0,165
12	0,043	28	0,106	44	0,169
13	0,047	29	0,110	45	0,173
14	0,051	30	0,114	46	0,177
15	0,055	31	0,118	47	0,181
16	0,059	32	0,122	48	0,185

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.168: Deformación vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Aplicando una carga constante al núcleo 1 del tramo Puente Jarcas - Piedra Larga se realizó el siguiente análisis.

Realizando el análisis de la figura 3.167 podemos observar que tiene un comportamiento que es casi de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2342 kg. con un desplazamiento de 0,185 plg.

La deformación de igual manera tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,185 siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir tiene una carga de 1171 kg.

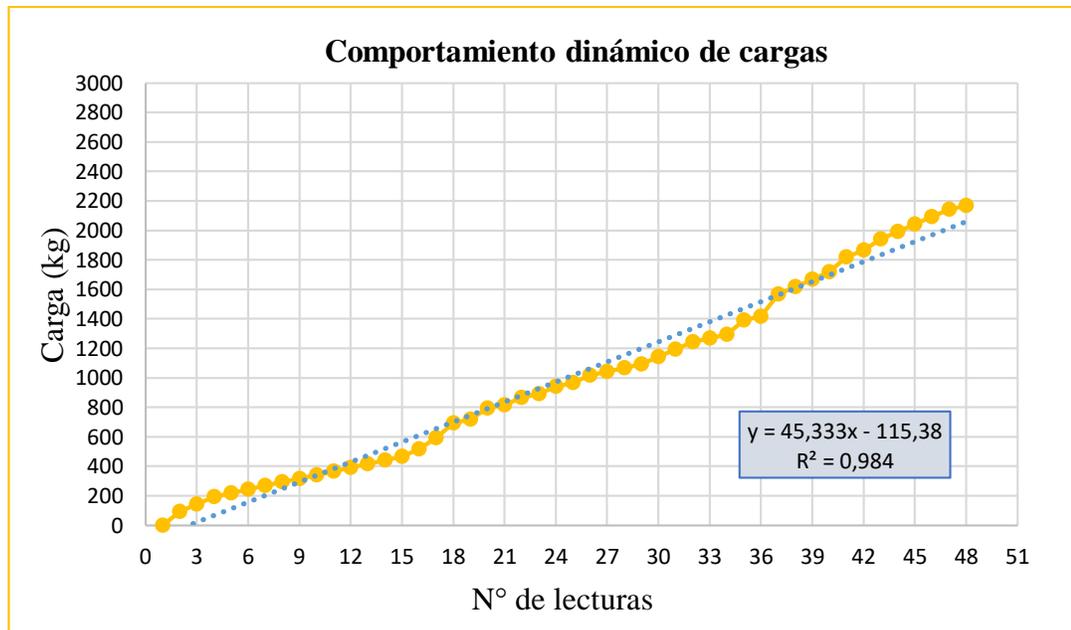
Núcleo N°2

Tabla 3.142: Cargas (kg) tramo N°3 - núcleo N°2

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	18	692,00	35	1392,000
2	92,000	19	717,00	36	1417,000
3	142,000	20	792,00	37	1567,000
4	192,000	21	817,00	38	1617,000
5	217,000	22	867,00	39	1667,000
6	242,000	23	892,00	40	1717,000
7	267,000	24	942,00	41	1817,000
8	292,000	25	967,00	42	1867,000
9	317,000	26	1017,00	43	1942,000
10	342,000	27	1042,00	44	1992,000
11	367,000	28	1067,00	45	2042,000
12	392,000	29	1092,00	46	2092,000
13	417,000	30	1142,00	47	2142,000
14	442,000	31	1192,00	48	2167,000
15	467,000	32	1242,00	49	2192,000
16	517,000	33	1267,00	50	2217,000
17	592,000	34	1292,00	51	2242,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.169: Cargas vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°2



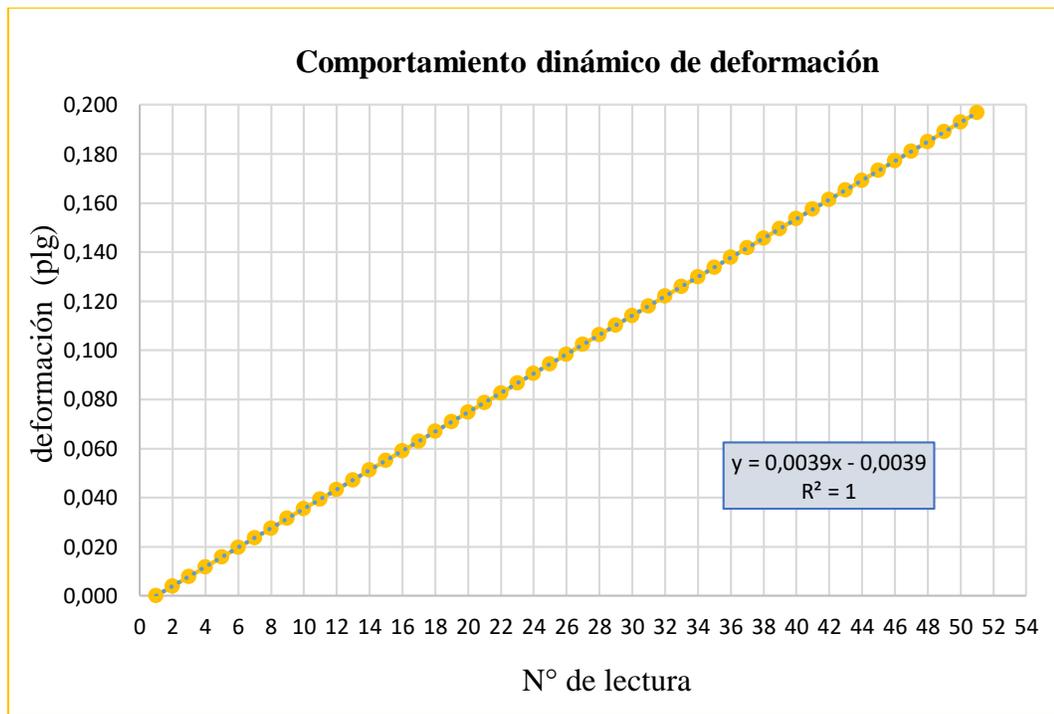
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.143: Deformación (plg) tramo N°3 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	18	0,067	35	0,134
2	0,004	19	0,071	36	0,138
3	0,008	20	0,075	37	0,142
4	0,012	21	0,079	38	0,146
5	0,016	22	0,083	39	0,150
6	0,020	23	0,087	40	0,154
7	0,024	24	0,091	41	0,157
8	0,028	25	0,094	42	0,161
9	0,031	26	0,098	43	0,165
10	0,035	27	0,102	44	0,169
11	0,039	28	0,106	45	0,173
12	0,043	29	0,110	46	0,177
13	0,047	30	0,114	47	0,181
14	0,051	31	0,118	48	0,185
15	0,055	32	0,122	49	0,189
16	0,059	33	0,126	50	0,193
17	0,063	34	0,130	51	0,197

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.170: Deformación vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Analizando el núcleo 2 de este tramo en la figura 3.169 se observa que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2242 kg. con un desplazamiento de 0,197 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,197 plg. sabiendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir se tiene una carga de 1121 kg.

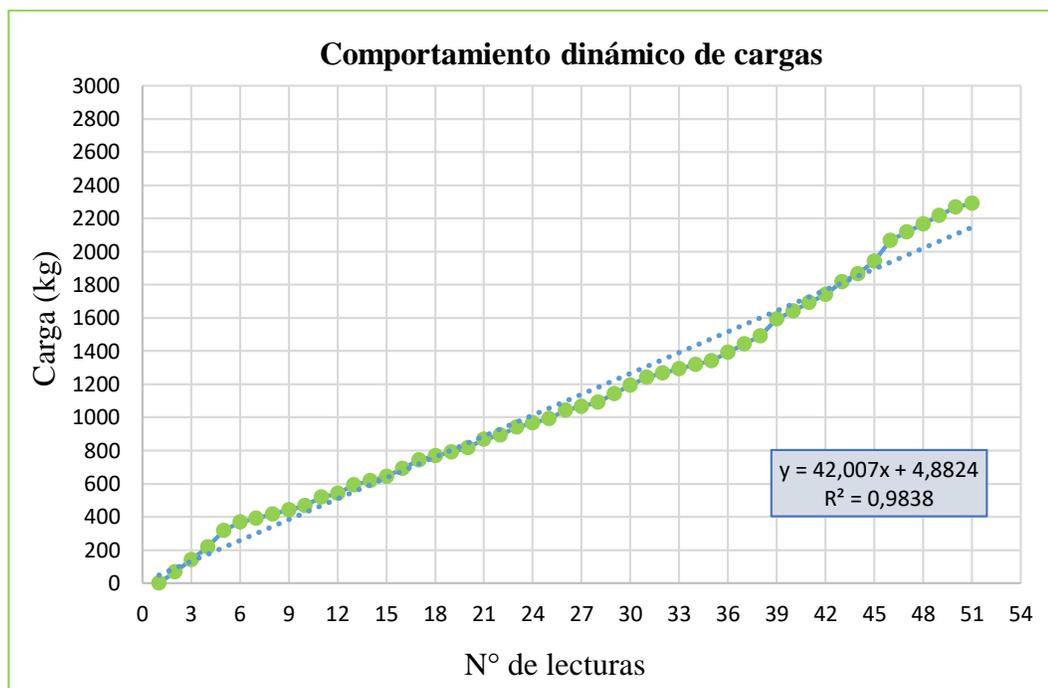
### Núcleo N°3

Tabla 3.144: Cargas (kg) tramo N°3 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga(kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	18	767,000	35	1342,000
2	67,000	19	792,000	36	1392,000
3	142,000	20	817,000	37	1442,000
4	217,000	21	867,000	38	1492,000
5	317,000	22	892,000	39	1592,000
6	367,000	23	942,000	40	1642,000
7	392,000	24	967,000	41	1692,000
8	417,000	25	992,000	42	1742,000
9	442,000	26	1042,000	43	1817,000
10	467,000	27	1067,000	44	1867,000
11	517,000	28	1092,000	45	1942,000
12	542,000	29	1142,000	46	2067,000
13	592,000	30	1192,000	47	2117,000
14	617,000	31	1242,000	48	2167,000
15	642,000	32	1267,000	49	2217,000
16	692,000	33	1292,000	50	2267,000
17	742,000	34	1317,000	51	2292,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.171: Cargas vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°3



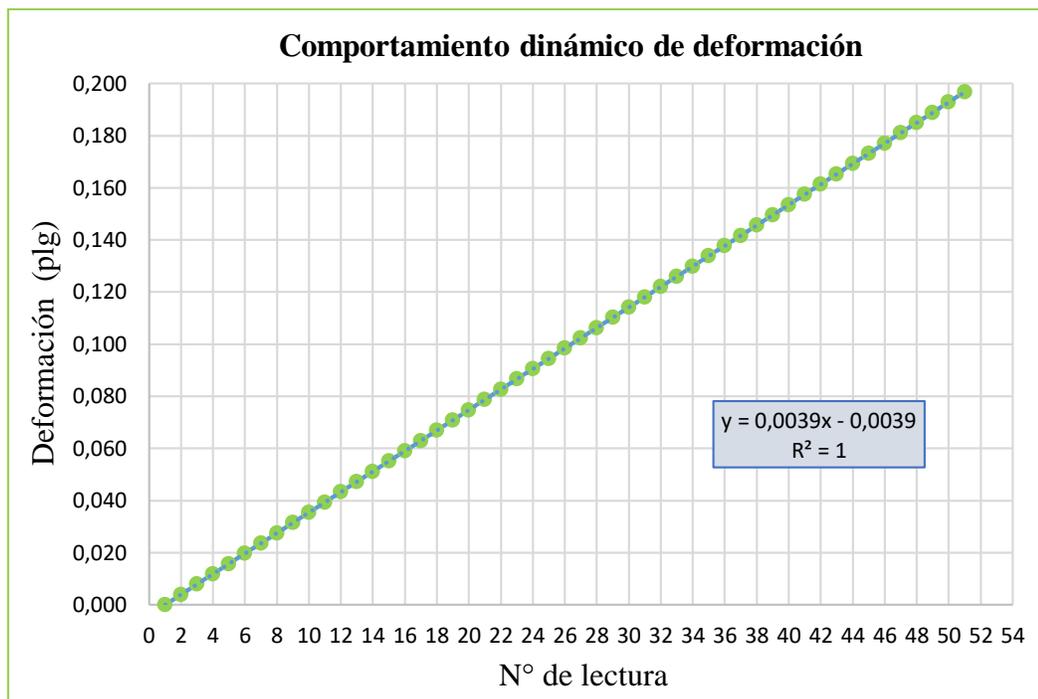
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.145: Deformación (plg) tramo N°3 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	18	0,067	35	0,134
2	0,004	19	0,071	36	0,138
3	0,008	20	0,075	37	0,142
4	0,012	21	0,079	38	0,146
5	0,016	22	0,083	39	0,150
6	0,020	23	0,087	40	0,154
7	0,024	24	0,091	41	0,157
8	0,028	25	0,094	42	0,161
9	0,031	26	0,098	43	0,165
10	0,035	27	0,102	44	0,169
11	0,039	28	0,106	45	0,173
12	0,043	29	0,110	46	0,177
13	0,047	30	0,114	47	0,181
14	0,051	31	0,118	48	0,185
15	0,055	32	0,122	49	0,189
16	0,059	33	0,126	50	0,193
17	0,063	34	0,130	51	0,197

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.172: Deformación vs N° de lecturas tramo N°3 - núcleo N°3



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de Puente Jarcas - Piedra Larga en la figura 3.171 se puede observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, y demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación; obteniendo una carga máxima de 2292 kg. con un desplazamiento de 0,197 plg.

De la misma manera la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,197 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir tiene una carga de 1146 kg.

De los tres núcleos obtenidos del tramo Puente Jarcas - Piedra Larga la máxima deformación que se presentó es de 0,197 plg, y la mínima es de 0,185 plg, tomando en cuenta que depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

## Tramo N°4: Piedra Larga - Canaletas

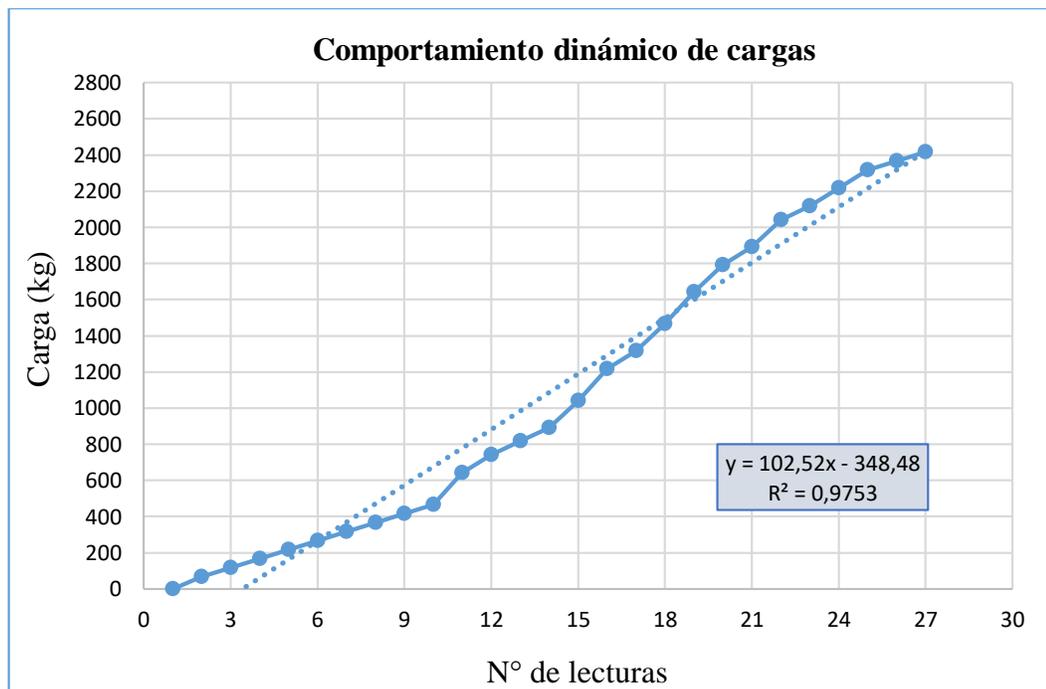
### Núcleo N°1

Tabla 3.146: Cargas (kg) tramo N°4 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
0	0,000	9	467,000	18	1642,000
1	67,000	10	642,000	19	1792,000
2	117,000	11	742,000	20	1892,000
3	167,000	12	817,000	21	2042,000
4	217,000	13	892,000	22	2117,000
5	267,000	14	1042,000	23	2217,000
6	317,000	15	1217,000	24	2317,000
7	367,000	16	1317,000	25	2367,000
8	417,000	17	1467,000	26	2417,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.173: Cargas vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°1



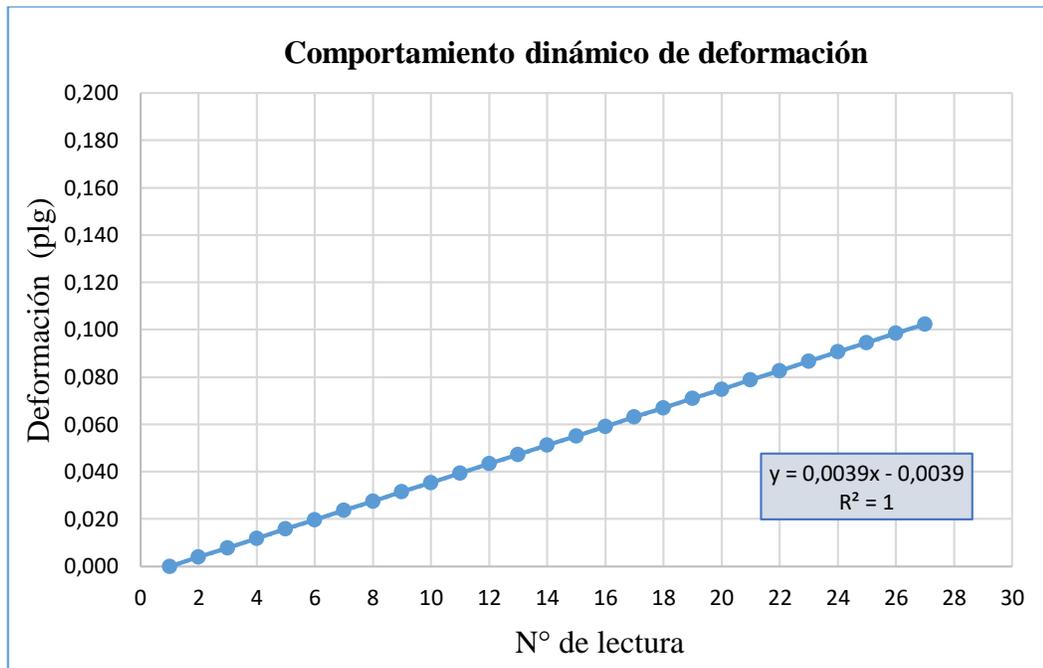
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.147: Deformación (plg) tramo N°4 - núcleo N°1

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	10	0,035	19	0,071
2	0,004	11	0,039	20	0,075
3	0,008	12	0,043	21	0,079
4	0,012	13	0,047	22	0,083
5	0,016	14	0,051	23	0,087
6	0,020	15	0,055	24	0,091
7	0,024	16	0,059	25	0,094
8	0,028	17	0,063	26	0,098
9	0,031	18	0,067	27	0,102

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.174: Deformación vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°1



Fuente: Elaboración propia

Aplacando la carga constante al núcleo 1 del tramo Piedra Larga - Canaletas se produce una deformación de la cual se tiene el siguiente análisis.

Realizando el análisis en la figura 3.173 podemos observar que tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2417 kg. con un desplazamiento de 0,102 plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,102 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir con una carga de 1208 kg.

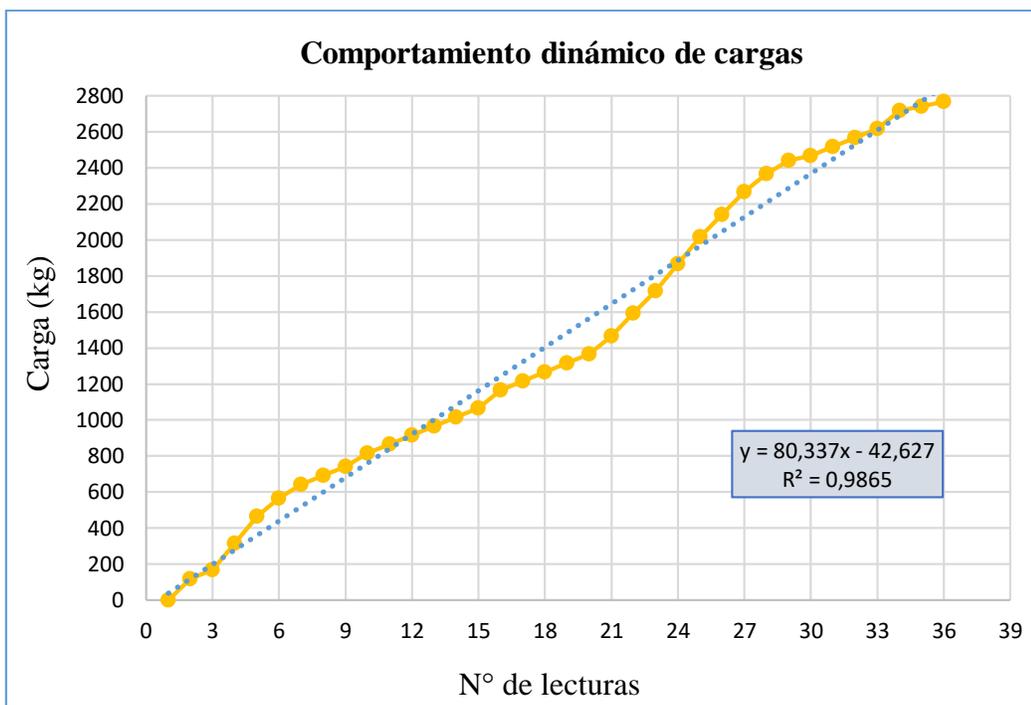
## Núcleo N°2

Tabla 3.148: Cargas (kg) tramo N°4 - núcleo N°1

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	13	967,000	25	2017,000
2	117,000	14	1017,000	26	2142,000
3	167,000	15	1067,000	27	2267,000
4	317,000	16	1167,000	28	2367,000
5	467,000	17	1217,000	29	2442,000
6	567,000	18	1267,000	30	2467,000
7	642,000	19	1317,000	31	2517,000
8	692,000	20	1367,000	32	2567,000
9	742,000	21	1467,000	33	2617,000
10	817,000	22	1592,000	34	2717,000
11	867,000	23	1717,000	35	2742,000
12	917,000	24	1867,000	36	2767,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.175: Cargas vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°2



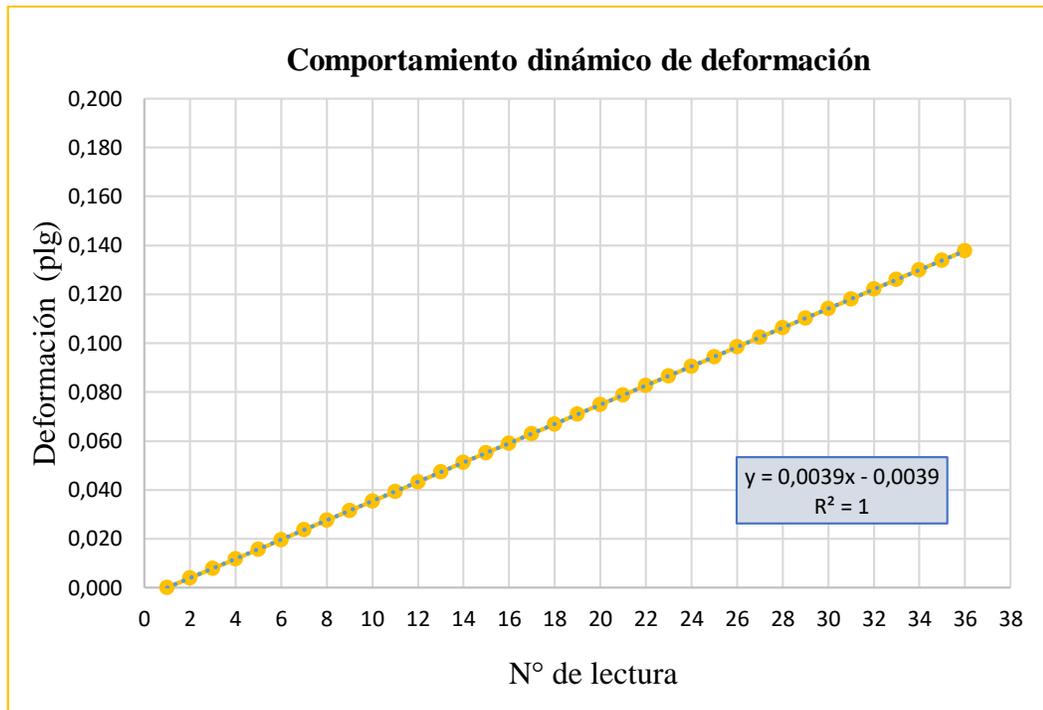
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.149: Deformación (plg) tramo N°4 - núcleo N°2

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	13	0,047	25	0,094
2	0,004	14	0,051	26	0,098
3	0,008	15	0,055	27	0,102
4	0,012	16	0,059	28	0,106
5	0,016	17	0,063	29	0,110
6	0,020	18	0,067	30	0,114
7	0,024	19	0,071	31	0,118
8	0,028	20	0,075	32	0,122
9	0,031	21	0,079	33	0,126
10	0,035	22	0,083	34	0,130
11	0,039	23	0,087	35	0,134
12	0,043	24	0,091	36	0,138

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.176: Deformación vs N° de lecturas N°4 - núcleo N°2



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis del núcleo 2 después de aplicar una carga constante, de la figura 3.175 se puede observar que tiene un comportamiento casi de tendencia lineal ascendente, donde se puede demostrar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2767 kg. con un desplazamiento de 0,138plg.

Así mismo la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal; donde la deformación a la carga máxima es de 0,138 plg. siendo que la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. de diseño es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir con una carga de 1383,5 kg.

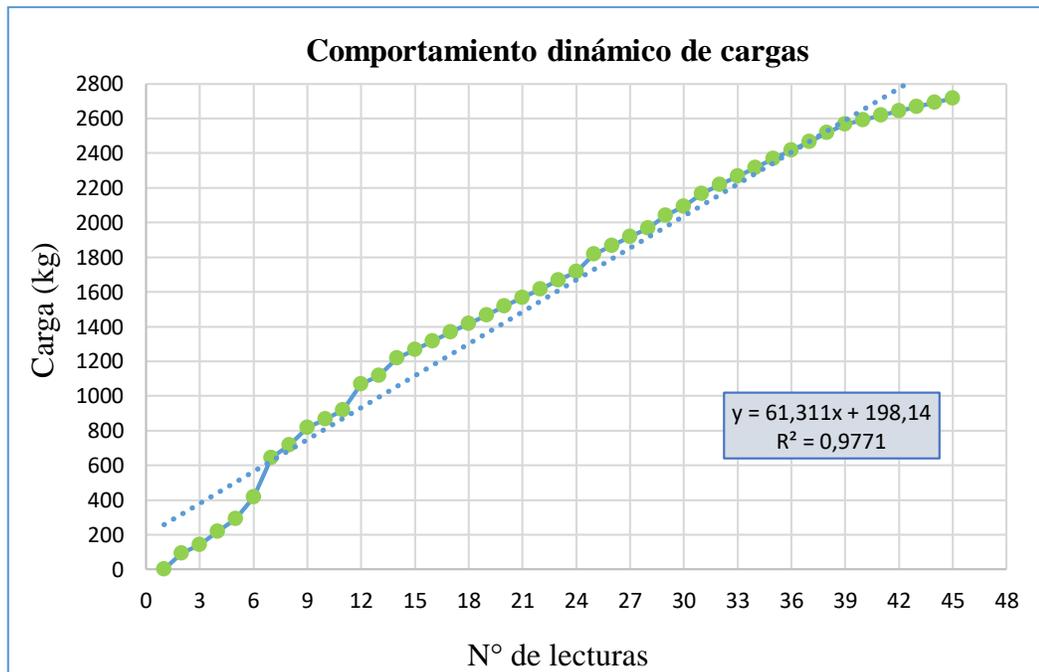
### Núcleo N°3

Tabla 3.150: Cargas (kg) tramo N°4 - núcleo N°3

N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)	N° de lecturas	Carga (kg)
1	0,000	16	1317,000	31	2167,000
2	92,000	17	1367,000	32	2217,000
3	142,000	18	1417,000	33	2267,000
4	217,000	19	1467,000	34	2317,000
5	292,000	20	1517,000	35	2367,000
6	417,000	21	1567,000	36	2417,000
7	642,000	22	1617,000	37	2467,000
8	717,000	23	1667,000	38	2517,000
9	817,000	24	1717,000	39	2567,000
10	867,000	25	1817,000	40	2592,000
11	917,000	26	1867,000	41	2617,000
12	1067,000	27	1917,000	42	2642,000
13	1117,000	28	1967,000	43	2667,000
14	1217,000	29	2042,000	44	2692,000
15	1267,000	30	2092,000	45	2717,000

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.177: Cargas vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°3



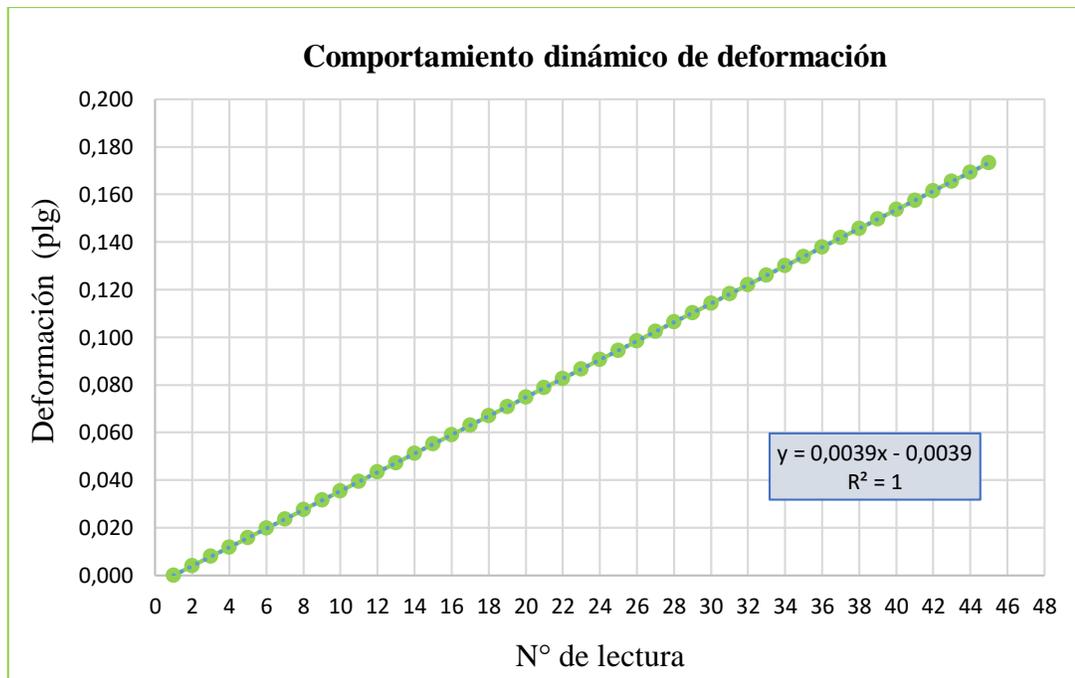
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.151: Deformación (plg) tramo N°4 - núcleo N°3

N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)	N° de lecturas	Deformación (plg)
1	0,000	16	0,059	31	0,118
2	0,004	17	0,063	32	0,122
3	0,008	18	0,067	33	0,126
4	0,012	19	0,071	34	0,130
5	0,016	20	0,075	35	0,134
6	0,020	21	0,079	36	0,138
7	0,024	22	0,083	37	0,142
8	0,028	23	0,087	38	0,146
9	0,031	24	0,091	39	0,150
10	0,035	25	0,094	40	0,154
11	0,039	26	0,098	41	0,157
12	0,043	27	0,102	42	0,161
13	0,047	28	0,106	43	0,165
14	0,051	29	0,110	44	0,169
15	0,055	30	0,114	45	0,173

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.178: Deformación vs N° de lecturas tramo N°4 - núcleo N°3



Fuente: Elaboración propia

Realizando el análisis de tramo Piedra Larga - Canaletas; de la figura 3.177 podemos observar que tiene un comportamiento casi de tendencia lineal ascendente, donde se demuestra que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación obteniendo una carga máxima de 2717 kg. con un desplazamiento de 0,173plg.

De la misma manera la deformación tiene un comportamiento de tendencia lineal donde la deformación a la carga máxima es de 0,173 plg. a la cual la máxima deformación que puede tener una mezcla asfáltica es de 0,20 plg.

La deformación a 0,1 plg. es la correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, es decir con una carga de 1358,5 kg.

De los tres núcleos obtenidos de este tramo la máxima deformación que se presentó es de 0,173 plg, y la mínima es de 0,102 plg, tomando en cuenta que depende de la aplicación de carga que transmiten los neumáticos por eje equivalente de los vehículos.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- La caracterización de los materiales pétreos se debe realizar con las normas AASTHO y ASTM que regulan el cumplimiento de las especificaciones de los materiales, por lo cual los agregados de la H.A.M y de SEDECA se verificó que cumplen con los parámetros. Se puede destacar un parámetro fundamental en la caracterización es el desgaste de “Los Ángeles” obteniendo para de los agregados de la H.A.M de la gravilla 27,80 %, grava 25,20 % y para los agregados de SEDECA, un valor de la gravilla 29,60% y grava 24,50 % cumpliendo con lo especificado que no debe ser mayor al 35 %, ya que si este parámetro no cumple con lo especificado los agregados no son aptos para la mezcla asfáltica.
- La caracterización del cemento asfáltico se la realiza con el fin de conocer sus características y ver si se encuentran dentro de las especificaciones marcadas por la fuente de producción; por lo tanto, el cemento asfáltico provisionado por la H.A.M y SEDECA (PROBISA 85/100) cumplen con las especificaciones establecidas, donde se considera que la ductilidad es una características más importantes de la cual se obtuvo una ductilidad de 105 cm, para cemento asfáltico de la H.A.M y de 110 cm para SEDECA.
- Para las briquetas elaboradas en laboratorio analizadas por tomografía computarizada, donde se obtuvo el porcentaje de vacíos de cada briqueta a diferentes contenidos de cemento asfáltico se realizó la comparación del porcentaje de vacíos obtenidos tanto por método Marshall como por tomografía computarizada, donde se obtuvo una variación máxima 0,29% y la mínima variación de 0,038 %, y se obtuvo valores mayores por el método de tomografía computarizada que por el método Marshall.
- De las briquetas elaboradas también se obtuvo el contacto de agregado - agregado que presenta cada mezcla asfáltica donde el mayor número de puntos de contacto de agregados es de 99 puntos cuya mezcla tiene 5,5 % de contenido de cemento asfáltico, la cual presenta una estabilidad de 4733,288 libras; con este análisis si

pudo comprobar que a mayores puntos de contacto de agregado – agregado hay mayor estabilidad de la mezcla.

- Para el análisis de los núcleos extraídos a través de las imágenes obtenidas por tomografía de mezclas asfálticas realizadas por la H.A.M. se obtuvo el promedio de porcentaje de vacíos de 4,08 % con una variabilidad de 0,047 y para SEDECA un 4,10% de vacíos con una variabilidad de 0,045; lo cual se puede verificar que están dentro de lo establecido por diseño es decir el 4 % de vacíos.
- Se obtuvo para el contacto agregado - agregado de mezclas asfálticas extraídas de tramos realizados por la H.A.M. una media de 96 puntos con una variabilidad de 71,378 y para SEDECA de 96 puntos de contacto con una variabilidad de 68,071, donde a mayor contacto agregado - agregado menor porcentaje de vacíos.
- Del análisis del comportamiento dinámico por la prensa CBR para los núcleos de la HAM, la máxima deformación que se presentó fue de 0,20 plg con una carga de 2492 kg, en el tramo avenida Felipe Palazón siendo la única mezcla que llegó a la máxima deformación de una mezcla asfáltica y la mínima deformación se presentó en el tramo de la calle Campero con 0,114 plg con una carga de 2267 kg.
- Para los núcleos de tramos de SEDECA la máxima deformación se produjo en núcleo del tramo Puente Jarcas - Piedra Larga con 0,20 plg con una carga 2492kg. y la mínima deformación de 0,102plg con una carga de 2242 kg; con este análisis se pudo comprobar que a medida que se incrementa la carga aumenta la deformación, donde se tiene un comportamiento de tendencia lineal ascendente; la máxima deformación que puede sufrir una mezcla asfáltica es de 0,2 de plg.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Para obtener valores de campo y laboratorio correctos se debe controlar la temperatura del compactado ya que de esto depende la cantidad de porcentajes de vacíos que puede presentar la mezcla asfáltica.
- Se recomienda la aplicación de la metodología por el grado de confiabilidad de los datos obtenidos, haciendo el uso del avance tecnológico y siendo un método accesible de aplicar en nuestro medio.

- Una parte importante de la aplicación de imágenes digitales a través de tomografía computarizada para evaluar las mezclas asfálticas depende del uso de programas de análisis de las imágenes, ya que sin estos programas no se podría obtener un análisis adecuado.
- Se recomienda realizar este método para poder evaluar una mezcla asfáltica puesta en obra ya que es la única manera con la que se puede obtener su porcentaje de vacíos, contacto agregado - agregado de una mezcla después de ser puesta para la circulación vehicular.
- Se recomienda utilizar la prensa CBR para medir las deformaciones a diferentes lecturas ya que es un método sencillo y rápido, además, accesible donde se puede obtener resultados preciso

