

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1. Antecedentes**

Uno de los parámetros fundamentales que afecta a la seguridad vial es la adherencia neumático-pavimento que viene marcada por la macrotextura y microtextura.

La microtextura depende de los agregados pétreos utilizados (textura superficial, granulometría, tamaño de la partícula) estos pueden tener características de tipo áspera o lisa. La macrotextura se genera por los defectos de la irregularidad superficial del pavimento producto de la puesta en obra en la extensión y compactación, las texturas se asocian a la resistencia al deslizamiento mientras que la rugosidad se asocia a la calidad y comodidad de la rodadura de los vehículos.

La resistencia al deslizamiento y la textura superficial de los pavimentos presentan la peculiaridad a diferencia de otros parámetros de los pavimentos, que no es constante en una escala temporal pequeña, sino que va fluctuando en función de múltiples condicionante tales como el clima, estado del pavimento, equipos de medida, y otros. Este hecho supone un gran inconveniente para los técnicos encargados de la conservación de las carreteras, debido a la dificultad añadida de interpretación y valoración de forma adecuada de los resultados obtenidos por las auscultaciones sistemáticas de la red de carreteras.

En la Evaluación del coeficiente de fricción del pavimento en 10 vías rápidas en Arequipa usando el péndulo de fricción británico TRRL, para desarrollar toda la metodología experimental para conocer el coeficiente de fricción de las diez vías a evaluar, todo esto enfocado a la seguridad vial, en este proyecto se planteó usar equipos de medición en campo como el péndulo de fricción británico (ASTM E-274) este ensayo con la finalidad de obtener el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CRD) en condiciones más desfavorables, el otro ensayo realizado es el del Círculo de Arena cuya finalidad es encontrar la profundidad textura media superficial (PT) del pavimento y los resultados muestran que el 80% de las vías evaluadas (8 de 10 vías) requiere un mantenimiento superficial para mejorar la microtextura y la macrotextura superficial del pavimento. De

las diez vías evaluadas solo dos cumplieron con el índice de fricción internacional (Cáceres, 2019).

En el Análisis de efecto de fricción a través del tiempo de servicio en pavimentos flexibles urbanos aplicado a la ciudad de Tarija, para hacer una evaluación superficial de la carpeta de rodadura de los pavimentos flexibles, aplicando métodos indirectos para calcular la disminución del Índice de Fricción Internacional (IFI), se verificó si este efecto es una de las causas para que estos pavimentos presenten fallas superficiales en la carpeta de rodado, durante el tiempo que se encuentra en servicio del usuario. aplicado exclusivamente en vías urbanas de la ciudad de Tarija, la metodología para cumplir este objetivo fue las mediciones en diferentes calles y avenidas con el instrumento de laboratorio Péndulo de Fricción Británico, con el cual se determinó el coeficiente de resistencia al deslizamiento, que asociado con el método del Círculo de Arena y así se calculó el índice de fricción internacional, llegando a la conclusión finalmente se pudo verificar que sí existe variación de la Fricción con el paso de los años en pavimentos flexibles de la Ciudad de Tarija y que esa variación es directamente proporcional al paso de los y que se debería hacer un mantenimiento de aquellas vías donde los valores de IFI sean menor a 0.45, esto ayudará a conservar y armonizar las vías urbanas de la provincia Cercado Tarija (Paredes, 2017).

El presente proyecto se centrará en el análisis de la relación de macrotextura y el coeficiente de resistencia al deslizamiento de un tramo de cinco kilómetros de la carretera Tomatitas-Erquis, ubicada en la provincia Méndez del departamento de Tarija, realizando una inspección visual y realizando los ensayos correspondientes según las normas ASTM E-274 y ASTM E-965 para el coeficiente de resistencia al deslizamiento y el círculo de arena.

La importancia de este estudio reside en encontrar el nivel de relación actual que existente entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura, y de esta forma determinar si el tramo es seguro en las condiciones más desfavorables de funcionalidad, no es alcance de la investigación utilizar algún método para mejorar la condición del tramo concernientes a las propiedades de resistencia al deslizamiento y la macrotextura.

Todo el estudio se realizará para condiciones funcionales más desfavorables, es decir, con presencia de agua en la vía, pues esto ocasiona la pérdida de control del vehículo por los fenómenos de hidroplaneo y/o derrapamiento.

El autor propone analizar el nivel de relación que existe entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura en el tramo escogido, en las condiciones funcionales más desfavorables del pavimento; para así, determinar, si existe una buena relación entre estas variables.

## **1.2. Justificación**

Un aspecto muy importante en la seguridad vial, es el nivel de agarre o rozamiento que experimenta la llanta del vehículo con la carretera. A mayor nivel de rozamiento, mayor es la fuerza que trata de oponerse al deslizamiento del vehículo, lo cual es necesario cuando el conductor debe tomar una curva a una velocidad moderada en carreteras principales o rotondas, o cuando debe frenar de emergencia. Por otro lado, pavimentos con nivel de rozamiento bajo brindan condiciones inseguras para los usuarios, siendo el derrape o pérdida del control del vehículo la causa común de accidentes en rutas que presentan esta condición. Cómo se deriva de lo anterior, mantener un valor mínimo de rozamiento de la superficie es vital para conservar las condiciones de servicio y seguridad normales de una vía (Badilla, 2011).

Las características antideslizantes de los pavimentos de carreteras desempeñan un papel importante en la seguridad de los usuarios. El peligro que representa una falta de adherencia suficiente debe ser evitado para reducir los accidentes en las vías sobre todo en regiones con alta presencia de lluvias, por eso, este proyecto se enfocara en una carretera que tiene un alto flujo vehicular en esa época húmeda, y así poder analizar la relación de la fricción y macrotextura de esta carretera y verificar si se cumplen con las condiciones adecuadas para un buena seguridad vial para que no incida negativamente en la comodidad y gastos de mantenimiento de los vehículos.

Lo que se pretende con este proyecto es medir y valorar el coeficiente de resistencia al deslizamiento (CDR) y la macrotextura (MTD) actual del tramo seleccionado, a través de dos ensayos no destructivos en campo el primero midiendo la fricción usando el péndulo

británico TRRL y el segundo usando el método volumétrico el cual es la mancha de arena, realizando así un análisis del comportamiento del CDR y la MTD , podremos encontrar si entre estas dos variables existe alguna correlación entre sí, si este fuera el caso podremos ajustar a una ecuación que relacione esta dos variables.

### **1.3. Planteamiento del problema**

#### **1.3.1. Situación problemática**

Dentro de la situación actual del país, el mayor problema, es no contar con parámetros o escalas de referencia que garanticen la seguridad en la operación de las carreteras relacionadas con la interacción del neumático-pavimento, en condiciones críticas (lluvia, pavimento mojado, etc.). Es por ello que el uso de un método que refleje la importancia de considerar la relación entre las medidas de fricción y textura, implica importantes ventajas para minimizar los accidentes relacionados con las condiciones del camino.

Al no analizar estos parámetros podría ocurrir mayores accidentes de tránsito debido al exceso de velocidad y el pavimento mojado ocasionando graves accidentes debido al hidroplaneo que es la situación en la que un vehículo atraviesa en la carretera a cierta velocidad una superficie cubierta de agua, llevándolo a una pérdida de control y tracción del mismo por parte del conductor pudiendo ocasionar algún accidente y/o atropello.

La ciudad de Tarija en los últimos años ha tenido un crecimiento acelerado del parque automotor, en el año 2005 se tenía un total de 28 612 vehículos en la ciudad, en el año 2015 se tiene que esa cifra creció al 87 301, teniendo un crecimiento del 305,12 % en el transcurso de los últimos 10 años, y en el año 2020 el número de vehículos fue de 118 439 según el instituto nacional de estadística (INE).

Por lo que se hace necesario analizar el nivel de relación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura en condiciones más desfavorables que podrían presentarse en el pavimento del tramo carretero Tomatitas-Erquis, siendo esta la presencia de agua sobre la superficie del pavimento.

#### **1.3.2. Relevancia y factibilidad del problema**

El peligro que representa una falta de adherencia suficiente debe ser evitado para reducir los accidentes en las vías sobre todo en regiones con alta presencia de lluvias.

Las cualidades de la fricción en el pavimento juegan un papel importante dentro de la seguridad en carreteras. La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático - pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos. Los métodos y sistemas usados a través del mundo para medición de textura y resistencia al deslizamiento varían significativamente; es por esta razón que el comité técnico de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (PIARC) en Caracterización Superficial, en 1992, decidió emprender un experimento internacional para comparar y armonizar mediciones de textura y resistencia al deslizamiento (López, 2001).

Para la auscultación de las carreteras se aplican equipos diversos, de primera o última generación y no existe una receta única de cuál o cuáles técnicas ofrecen los mejores resultados, ya que esto estará dado y será decidido por el aspecto económico de la administración vial que corresponda. Dentro de los más conocidos a nivel internacional se encuentran: el Sideways-force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM), para mediciones continuas; y el péndulo británico, el Círculo de Arena y el Drenómetro para medidas puntuales. Estos dispositivos en general sirven para caracterizar la resistencia al deslizamiento a medianas velocidades.

Para este proyecto se plantea usar equipos de medición puntuales en campo como el péndulo de fricción británico (ASTM E-274) este ensayo con la finalidad de obtener el coeficiente de resistencia al deslizamiento en condiciones más desfavorables (pavimento mojado), el otro ensayo a realizarse es el del Círculo de Arena (ASTM E-965) cuya finalidad es encontrar la profundidad textura media superficial del pavimento.

### **1.3.3. Delimitación temporal y espacial del problema**

En cuanto a la delimitación temporal los datos que serán considerados para la realización del trabajo de investigación propuesto serán enmarcados dentro del periodo de validez del actual VOLUMEN 4. ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES de los Manuales técnicos para el diseño de carreteras de la administradora boliviana de carreteras (A.B.C), considerando únicamente la temática del análisis del coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura del pavimento del tramo.

Por la naturaleza de los datos y de cómo se obtienen, se aplicarán únicamente al tramo de pavimento flexible, los datos obtenidos solo servirán hasta el primer mantenimiento de la carretera.

Los datos del coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura del pavimento del presente proyecto no son aplicables para el análisis de otros tramos carreteros, ya que las condiciones climáticas y las condiciones de serviciabilidad del pavimento varían según la región.

Para la delimitación espacial de este proyecto, se ha seleccionado un tramo, la ruta Tomatitas-Erquis, ubicado en la provincia Méndez, con una longitud de cinco kilómetros.

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas de inicio y fin del tramo seleccionado.

**Tabla N° 1 Ubicación geográfica del tramo**

<b>Descripción</b>	<b>progresiva</b>	<b>latitud</b>	<b>longitud</b>	<b>Altura (m.s.n.m)</b>
Colegio de Tomatitas	0+000	21°29'54,03'' S	64°45'50,18'' O	1927
Erquis Sud	5+000	21°28'38,31'' S	64°46'50,82'' O	2060

**Fuente:** Elaboración propia

#### **1.3.4. Problema**

Analizada la situación problemática podemos expresar el siguiente problema de investigación:

**¿Cuál será el nivel de relación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura del tramo Tomatitas-Erquis?**

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar la relación que existe entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura en el tramo Tomatitas-Erquis, para las condiciones funcionales más desfavorables del pavimento, y determinar así, si existe una buena relación entre estas variables.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Analizar el sustento teórico que respalda al coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura de carreteras.
- Identificar el tramo de estudio Tomatitas-Erquis con sus características.
- Realizar la medición del coeficiente de resistencia al deslizamiento mediante el método del péndulo británico TRRL en el tramo de estudio.
- Realizar la medición de Macrotextura mediante el método del círculo de arena en el tramo de estudio.
- Determinar el procedimiento de correlación y la relación entre las variables en estudio.
- Analizar los resultados obtenidos en la correlación.
- Establecer la conclusiones y recomendaciones sobre el estudio realizado.

### **1.5. Alcance de la investigación**

La presente investigación es de tipo correlacional y tiene un alcance no experimental (Sampieri, 2014).

La investigación correlacional se orienta a la determinación del grado de relación existente entre dos o más variables de interés en una misma muestra de sujetos o el grado de relación existente entre dos fenómenos o eventos observados.

Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular. En ocasiones sólo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables. Para evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, en los estudios correlacionales primero se mide cada una de éstas, y después se cuantifican, analizan y establecen las vinculaciones. (Sampieri, 2014).

Es una investigación no experimental: Se observan fenómenos tal como se dan en su contexto natural, no hay manipulación de variables que intervengan a la investigación; con un diseño transeccional correlacional-causal, Este diseño, no describe las variables, sino la relación que existe entre ellas, en un momento único.

El presente trabajo propone el análisis de la relación entre macrotextura y el coeficiente de deslizamiento de un tramo de cinco kilómetros de la carretera Tomatitas-Erquis, ubicada en la provincia Méndez del departamento de Tarija, realizando una inspección visual y realizando los ensayos correspondientes establecidos en las normas ASTM E-274 y ASTM E-965 para el coeficiente de resistencia al deslizamiento y el círculo de arena, analizando doscientos puntos de control de coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura.

La importancia de este estudio reside en encontrar el nivel de relación que existente entre el coeficiente de deslizamiento y la macrotextura, y determinar si el tramo es seguro en las condiciones más desfavorables de funcionalidad, siendo esta situación con presencia de humedad sobre el pavimento.

No es alcance de la investigación utilizar algún método para mejorar la condición del tramo concernientes a las propiedades de resistencia al deslizamiento y la macrotextura; además, este proyecto solo se enfoca en pavimento flexible.

Todo el estudio se realizará para condiciones más desfavorables de funcionalidad, es decir, con presencia de agua en la vía, pues esto ocasiona la pérdida de control del vehículo por los fenómenos de hidropilano.

## **1.6. Hipótesis**

“Sí existe una relación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura del tramo Tomatitas-Erquis, entonces, se podrá explicar la tendencia del coeficiente de resistencia al deslizamiento respecto a la macrotextura en el tramo estudiado”.

**Hipótesis correlacional entre Macrotextura y coeficiente de resistencia al deslizamiento.**

$H_0$ : No hay correlación entre Macrotextura y coeficiente de resistencia al deslizamiento del tramo Tomatitas-Erquis.

$H_1$ : Hay correlación entre Macrotextura y coeficiente de resistencia al deslizamiento del tramo Tomatitas-Erquis.



**Resultado de significancia:**

Valor- $P \geq 0.05$  se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ).

Valor- $P < 0.05$  se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ).

**1.7. Operacionalización de las variables****1.7.1. Variable Dependiente**

- El coeficiente de resistencia al deslizamiento

**Tabla N° 2 Conceptualización de la variable dependiente**

<b>Variable</b>	<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Acción/valor</b>
Coeficiente de resistencia al deslizamiento	BPN, son las siglas correspondientes a British Pendulum Number (Número de Péndulo Británico).  Esta es la unidad en que se mide el coeficiente de roce del pavimento, cuyo rango va desde 0 a 100. El resultado del ensayo de resistencia al deslizamiento se expresa en tanto por uno.	microtextura	adimensional	< 0.5 Malo (derrapamiento del vehículo)
				0.51 – 0.6 De regular a bueno
				0.61 – 0.8 Bueno
				0.61 – 0.8 Bueno
				0.81 – 0.9 De bueno a regular
				> 0.91 Malo (desgaste de neumáticos)

**Fuente:** Elaboración propia

### 1.7.2. Variable Independiente

- La macrotextura del pavimento

**Tabla N° 3 Conceptualización de variable independiente**

Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Acción/valor	
Macrotextura	La macrotextura es la desviación de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana verdadera, con longitudes de onda entre los 0.5 milímetros y los 50 milímetros medidos en la horizontal, en tanto que en la vertical es del orden de 0.2 a 10 milímetros.	Textura	Milímetros (mm)	Muy fina	$H < 0,20$
				Fina	$0,20 < H < 0,40$
				Media	$0,40 < H < 0,80$
				Gruesa	$0,80 < H < 1,20$
				Muy gruesa	$> 1,20$

**Fuente:** Elaboración propia

## CAPÍTULO II

### COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO Y MACROTEXTURA DEL PAVIMENTO

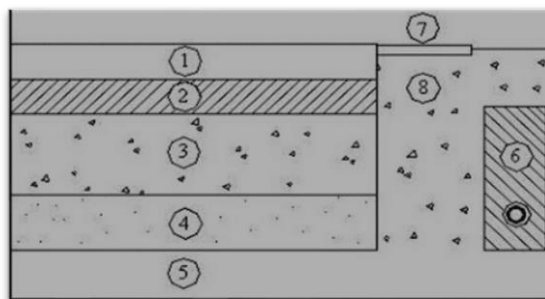
#### 2.1. Pavimento flexible

La palabra pavimento proviene del latín (pavimentum), el pavimento está constituido por capas superpuestas, relativamente horizontales que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados, y adecuadamente compactados. Estas estructuras de estratos se apoyan sobre una sub rasante obtenida mediante el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito que le transmiten durante el periodo de la vida útil para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.<sup>1</sup>

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

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

**Figura N° 1 Estructura de un pavimento flexible**



**Fuente:** Instituto tecnológico de aeronáutica, Brasil

<sup>1</sup> Gonzalo Álvarez barriga (EVALUACIÓN SUPERFICIAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL TRAMO "PUERTA DEL CHACO – CARLAZO"- DICIEMBRE DE 2013

**Donde:**

1. Capa de Rodadura
2. Capa Base
3. Capa Sub-base
4. Suelo Compactado
5. Sub rasante
6. Sub-drenaje longitudinal
7. Revestimiento de Bermas
8. Sub-base de Bermas

**2.2. Características de los pavimentos flexibles**

Un pavimento debe cumplir adecuadamente sus funciones, debe reunir los siguientes requisitos:

- Resistir a la acción de las cargas impuestas por el tráfico.
- Resistir ante los agentes del intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto transversal como longitudinalmente, que permitan comodidad y confort a los usuarios en función a las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de diseño.
- Debe ser durable.
- Debe presentar adecuadas condiciones respecto al drenaje.
- La sonoridad en el interior del vehículo que afecta al usuario, así como en el exterior, que influye en el entorno, debe ser moderada.
- Debe ser económico.

- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

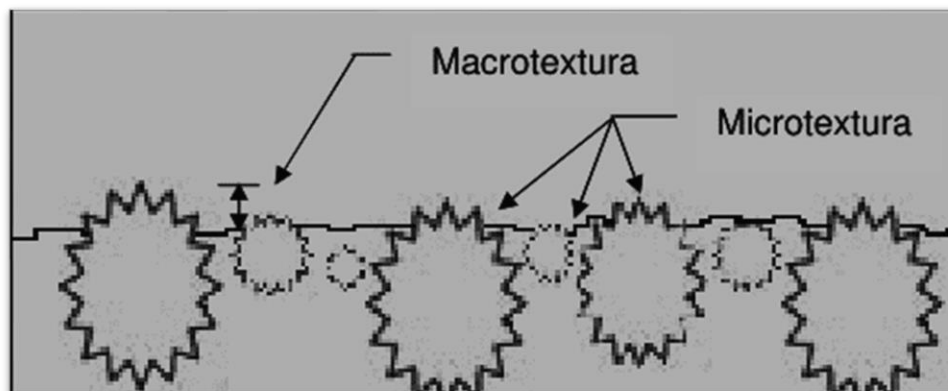
### 2.3. Textura superficial de pavimentos flexibles

Un aspecto de seguridad importante que debe cumplir un pavimento es entregar al usuario una superficie cuya textura asegure una buena adherencia entre neumático y carpeta de rodadura, una fricción adecuada en situaciones normales de circulación, en curvas, zonas de frenado y sobre todo al encontrarse el pavimento eventualmente mojado.

El fenómeno de fricción depende de dos conceptos: microtextura y macrotextura. Mientras que el primero representa la aspereza y textura propia del árido, el segundo representa la profundidad de la mayor o menor exposición del árido grueso fuera del mortero (ver Figura N°2). Ambas propiedades ayudan a proporcionar la fricción necesaria del pavimento bajo distintas condiciones.

La microtextura es la responsable de la fricción a velocidades bajas (50 a 60 [Km./h]), en tanto que la macrotextura es la que permite aumentar la adherencia al drenar el agua bajo el neumático cuando este circula a velocidades más altas.

**Figura N° 2 Macrotextura y Microtextura del pavimento**



**Fuente:** Gustavo Felipe Arriagada Álvarez, 2008.

La microtextura y la macrotextura están relacionadas entre sí ya que son alteraciones deseables, que contribuyen con la resistencia al deslizamiento y a la prevención de los accidentes. Para que un pavimento ofrezca una suficiente adherencia a cualquier velocidad de los vehículos, debe tener una macrotextura que contribuya a la expulsión del agua y

una microtextura que garantice la adherencia por tanto cuando uno de estos elementos está degradado el otro se ve también afectado. (Ramírez, 2005)

Por otro lado, la resistencia al deslizamiento es una propiedad del pavimento que describe su grado de adherencia. Es la fuerza resultante de la interacción del neumático con el pavimento y está estrechamente (relacionada con la textura pues para que una superficie de rodamiento brinde una resistencia al deslizamiento adecuado, es necesario que las áreas en contacto con las ruedas tengan una textura lo suficientemente marcada (microtextura) y la capa de rodamiento debe facilitar el desalojo del agua (macrotextura). (Ramírez, 2005)

Cuanto mayor sea el valor de la macrotextura, mejor será la capacidad de evacuación de agua en la interfaz neumático pavimento, sin embargo, esta elevada capacidad de drenaje hace que exista un mayor nivel de ruido. También, cuanto mayor sea el valor de la microtextura habrá mejor adherencia entre el neumático y el pavimento; sin embargo, esto produce un mayor desgaste de los neumáticos. Es importante entonces, encontrar un punto en que ambas se compensen. (Barraza Elespuru, 2004).

### **2.3.1. Funciones de la textura**

- Debe ser elevada para permitir la evacuación del agua en el interfaz neumático – pavimento.
- Debe ser pequeña para proporcionar un menor nivel de ruido.
- Debe ser homogénea para ofrecer en toda la superficie la misma capacidad de evacuación de agua.

El funcionamiento del pavimento está ligado en muchos aspectos a sus características de textura. (Leiva, 2005)

La textura del pavimento es un parámetro crítico en la comodidad y la seguridad de los usuarios, ésta influye de manera directa en la capacidad del pavimento para evacuar agua de la interface neumático-pavimento. En el aspecto económico, la textura influye en el consumo de gasolina, en el deterioro de los vehículos y sobre todo en el desgaste de los neumáticos. (Rio, 1999).

### 2.3.2. Microtextura

Referido a la textura superficial de los agregados (áspera o pulida) que conforma la superficie del pavimento. Se mide la microtextura de una manera indirecta con el coeficiente de fricción.

Esta microtextura principalmente depende del mineral que lo conforma y es necesaria pues es la que brinda la resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas y secas. Una buena superficie de rodadura debe ofrecer una buena adherencia entre el neumático y el pavimento mediante una microtextura áspera del agregado. (Mundaca, 2019).

La aspereza del agregado pétreo va disminuyendo con el paso del tiempo por el tránsito vehicular es por eso por lo que es recomendable brindar un adecuado mantenimiento a las vías. (Roco H, Fuentes L, & Valverde P, 2003).

Es decir, un árido determinado, ubicado en la superficie de rodamiento, que tenga un alto grado de pulimento producirá valores bajos de microtextura, ya que, ésta se considera particularmente importante en la valoración de la resistencia al deslizamiento de la superficie.

Una forma indirecta de medir la microtextura es mediante el coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r). La microtextura siempre es necesaria, hasta en una carretera seca. Es por este motivo que está directamente asociada con la resistencia al deslizamiento.

**Tabla N° 4 Valores de fricción con Péndulo Británico TRRL**

<b>c.d.r</b>	<b>Calificación</b>
<0,50	Malo (Deslizamiento del vehículo)
0,51-0,60	De regular a bueno
0,61-0,80	Bueno
0,81-0,90	De bueno a regular
>0,91	Malo (Desgaste de los neumáticos)

**Fuente:** Modelo PIARC

### 2.3.3. Macrotextura

La Macrotextura va referido a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie. La profundidad de textura media está dada por el tipo de mezcla asfáltica o de concreto hidráulico que exista en la superficie.

La capacidad de drenaje de la superficie del pavimento es brindada por una adecuada macrotextura pues permite la salida del agua con mayor rapidez reduciendo riesgos por hidroplaneo (Wong, 1978).

La macrotextura es la textura superficial del propio pavimento. Son el conjunto de partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie. Esta es importante ya que permite evacuar el agua de la superficie, de tal manera que ésta se pueda quedar en las depresiones. Es así como existirá mayor contacto entre el neumático y el pavimento.

La Macrotextura tiene una pequeña influencia en el consumo de combustible, al aumentar la resistencia al rodamiento; pero puede estar compensada por una ligera disminución de la velocidad de circulación.

Mejora la visibilidad y las propiedades ópticas del pavimento, al reducir las proyecciones del agua y producir una reflexión difusa. Un drenaje más eficaz permite también una mejor visibilidad de las marcas viales y una evacuación inmediata del agua superficial que redundará en una mejora en la seguridad de operación, al evitarse el hidroplaneo. (López, 2001).

**Tabla N° 5 Textura en pavimentos para el círculo de arena**

<b>Textura</b>	<b>MTD (mm)</b>
Muy fina	$H < 0,20$
Fina	$0,20 < H < 0,40$
Media	$0,40 < H < 0,80$
Gruesa	$0,80 < H < 1,20$
Muy gruesa	$H > 1,20$

**Fuente:** Modelo PIARC



## **2.4. Fricción en pavimentos flexibles**

Esta característica del pavimento también es un valor crítico en la seguridad, cuando el pavimento está mojado. Su medida y estudio es fundamental en carreteras de alta velocidad y/o elevada intensidad de tráfico (carreteras de altas especificaciones). La fricción se determina de forma indirecta, midiendo el coeficiente de rozamiento entre el pavimento artificialmente mojado y una rueda de goma "estandarizada".

El coeficiente de rozamiento (o fricción) es el parámetro que se emplea para determinar el nivel de adherencia entre el neumático y el pavimento. El valor del coeficiente de rozamiento depende de una serie de factores, algunos inherentes a la carretera, mientras que otros son responsabilidad del usuario (como la velocidad y el estado de los neumáticos del vehículo) o de la meteorología (lluvia, nieve o hielo sobre la calzada, etc.). La demanda de rozamiento es función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera. A su vez la capacidad de responder a esa demanda es función del tipo y del estado del pavimento. (Sandoval, 2000).

Al igual que otras características superficiales, los niveles de adherencia de un pavimento evolucionan con el tiempo, como consecuencia del pulido de la superficie por la acción repetida de los neumáticos de los vehículos. Por tanto, se tiene que comprobar el coeficiente de rozamiento (fricción) mediante técnicas de auscultación.

### **2.4.1. Resistencia al deslizamiento**

La resistencia al deslizamiento, puede definirse como la fuerza desarrollada cuando un neumático está impedido de deslizar por una superficie. Representa la interacción entre el neumático de un automóvil y el pavimento, sin considerar la demanda de fricción producto de las aceleraciones tangenciales o transversales a las que se ve sometido un automóvil. (Pórtela, 2018).

El fenómeno de la resistencia al deslizamiento involucra siempre al menos a dos cuerpos dentro de un medio. Físicamente, esta interacción toma sentido en un estado de movimiento relativo entre ambos cuerpos, surgiendo entonces un cuarto aspecto a considerar en el análisis: la velocidad de circulación. La relación entre estos factores, determinará si los neumáticos rotan y se trasladan, rotan, o solo se trasladan (se deslizan).

De estos factores, es más factible que sean controlados aquellos asociados al tipo de neumático y a las características del pavimento. Dado que el tipo de neumático es un aspecto asociado a la tecnología del automóvil, la atención se centra en las características del pavimento que determinan la oferta de la fricción. (Leiva, 2005)

#### **2.4.2. Factores que influyen en la resistencia al deslizamiento**

Para lograr una adecuada resistencia al deslizamiento se deben considerar los siguientes factores:

- Una macrotextura, que facilite el drenaje y el desplazamiento del volumen de agua entre el neumático y el pavimento.
- Una microtextura, que contenga partículas duras de alta resistencia al pulimiento.
- La dosis de cemento o ligante bituminoso según sea el caso, debe asegurar una fuerte adherencia entre los agregados evitando su desprendimiento de la superficie de rodado.
- La textura debe conservarse durante largo tiempo.

Al frenar el vehículo o realizar cierta maniobra se debe obtener la máxima adherencia de contacto entre los neumáticos.

En las curvas, las reacciones transversales del pavimento, deben mantener al vehículo sobre una trayectoria precisa, y que no se produzca deslizamiento. (Muñoz, 2015)

Para evaluar la capacidad de resistencia al deslizamiento, se puede proceder de dos formas distintas:

- Midiendo directamente el coeficiente de fricción o rozamiento entre el neumático y el pavimento mojado.
- Analizando la macrotextura o la capacidad de drenaje superficial del pavimento para estimar la reducción de la adherencia que se produce al aumentar la velocidad. (León, 2000)

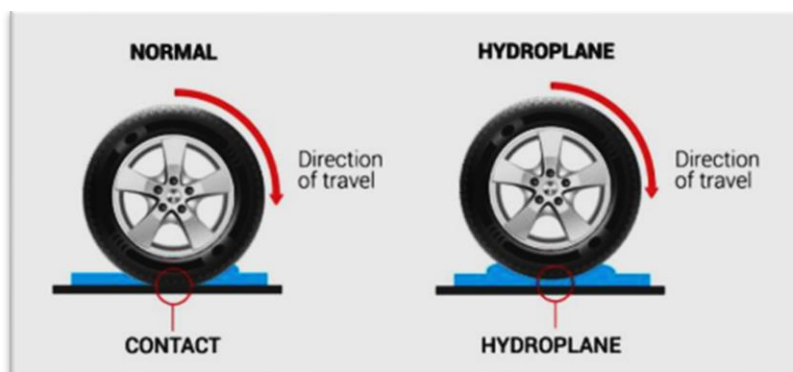
### 2.4.3. Presencia de agua en la superficie

El espesor de la película de agua sobre la calzada en ocasiones produce pérdida de control, lo cual es conocido como hidropneumático. Este se produce cuando el espesor de la película es apreciable y el vehículo viaja a alta velocidad y en texturas muy finas que no dan tiempo de evacuar el agua entre el neumático y el pavimento. Los neumáticos pierden contacto con la superficie del pavimento. Se puede evitar a través de una macrotextura adecuada de la carpeta de rodado, de tal forma que se produzca un contacto directo entre neumático y pavimento. (Pórtela, 2018).

### 2.4.4. Hidropneumático

El hidropneumático se produce cuando la microtextura y la macrotextura no son las adecuadas para una correcta adherencia y drenaje de agua superficial. La llanta pierde el contacto directo con la superficie del pavimento cuando entre estos se interpone un agente contaminante (usualmente el agua). (Mundaca, 2019).

**Figura N° 3 Representación gráfica del fenómeno de hidropneumático**



**Fuente:** Evaluación del coeficiente de fricción del pavimento en 10 vías rápidas en Arequipa usando el péndulo de fricción británico TRRL, 2019.

## 2.5. Modelo de la PIARC

El modelo PIARC relaciona la fricción de un pavimento con la velocidad de deslizamiento de un vehículo, sobre la superficie de rodadura. El modelo es de tipo exponencial y se describe en función de una constante " $FR_{60}$ ", referida a la velocidad de deslizamiento a 60kph. Esto permite convertir la medida de fricción realizada a cualquier velocidad ( $FR_S$ ),

a una medida de fricción de 60kph ( $FR_{60}$ ), a partir de una constante de referencia de la velocidad ( $Sp$ ).

Las siglas, PIARC, reconocidas mundialmente, responden al nombre de la Asociación Mundial de la Carretera y constituyen el nombre de la Asociación en inglés Permanent International Association of Road Congresses (PIARC).

### **2.5.1. Índice de fricción internacional (IFI)**

Como ya se dijo anteriormente, por definición, la pareja de valores indicados por ( $F60$ ,  $Sp$ ) se designa como el Índice de Fricción Internacional (IFI) de un pavimento, su conocimiento permite dibujar la curva de referencia estimada de Fricción- velocidad de deslizamiento, que representa la condición prevaleciente del pavimento.

El modelo PIARC descrito es la base de la definición del Índice de Fricción Internacional, IFI, a través de los parámetros  $F60$  y  $Sp$ . Así entonces, el IFI de un pavimento se expresa por el par de valores ( $F60$ ,  $Sp$ ) expresados entre paréntesis y separados por una coma; el primer valor representa la fricción y el segundo la macrotextura.

El primero es un número adimensional y el segundo es un número positivo sin límites determinados y con unidades de velocidad (km/h). El valor cero de fricción indica deslizamiento perfecto y el valor uno, adherencia. No es posible, por el momento, describir con una relación sencilla el segundo número que compone el IFI.

### **2.5.2. Determinación del parámetro $Sp$**

Durante la elaboración del modelo, y a partir de los datos del experimento PIARC, se ha comprobado que la constante de velocidad  $Sp$  puede ser determinada mediante una regresión lineal en función de la medida en campo de la macrotextura ( $T_x$ ) tal que:

$$Sp = a + (b * T_x)$$

Donde los valores de las constantes  $a$  y  $b$  para cada uno de los equipos que participaron en el experimento se presentan en la Tabla N°6.

**Tabla N° 6 Valores de a y b para la estimación de la constante de velocidad**

Macrotextura (Tx)	a	b
MTD / Círculo de Arena (método de prueba E-965)	-115,981	113,632

**Fuente:** Modelo PIARC

### 2.5.3. Determinación del parámetro F60

Para la estimación de F60 se establece el tipo de equipo a emplear y se realiza la medición de la fricción FRS en una sección de un pavimento dado. Se determina la velocidad S que depende del tipo de la rueda de medición y de la velocidad V del vehículo de arrastre de acuerdo a lo que se indica en la Tabla.

**Tabla N° 7 Ecuaciones para determinar S según el tipo de equipo**

Tipo de equipo	Ecuación para determinar S
Con rueda bloqueada	$S = V$
Con rueda parcialmente bloqueada	$S = V$ por el % de deslizamiento
Con rueda oblicua	$S = V$ por el $\text{Sen } \alpha$ , donde $\alpha =$ ángulo de esviaje

**Fuente:** Modelo PIARC

Se determina el valor de la constante FR60 usando el valor de la fricción FRS obtenida en campo con algún equipo a la velocidad de deslizamiento S a partir de la ecuación mostrada, de donde despejando FR60 se obtiene:

$$FR60 = FRS * e^{\frac{S-60}{Sp}}$$

Donde:

FR60 = Valor de fricción ajustado

FRS = Valor de fricción medido por el dispositivo a la velocidad de deslizamiento (S)

S = Velocidad de deslizamiento seleccionado por el dispositivo, (km/h)

$S_p$  = Gradiente de velocidad (km/h)

Finalmente se obtiene el valor buscado de  $F_{60}$  a través de la siguiente correlación con  $FR_{60}$  establecida por el experimento PIARC:

$$F_{60} = A + (B * FR_{60})$$

Donde A y B son constantes según el equipo utilizado para medir la Fricción y sus valores se muestran en la Tabla N°8.

**Tabla N° 8 Valores de A y B para estimar la fricción (F60)**

<b>Equipo (según cálculo de <math>S_p</math>)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
MTD / Péndulo Británico (ASTM E 274)	0,078	0,0107

**Fuente:** Modelo PIARC

#### **2.5.4 Implementación del IFI**

Determinados los parámetros mencionados anteriormente se dice entonces que el tramo de pavimento en estudio tiene un valor del Índice de Fricción Internacional que se expresa como IFI ( $F_{60}$ ,  $S_p$ ). El conocimiento de esos parámetros permite además conocer la curva de referencia estimada de fricción en función de la velocidad de deslizamiento con una ecuación análoga que se expresa como:

$$F(s) = F_{60} * e^{\frac{60-s}{S_p}}$$

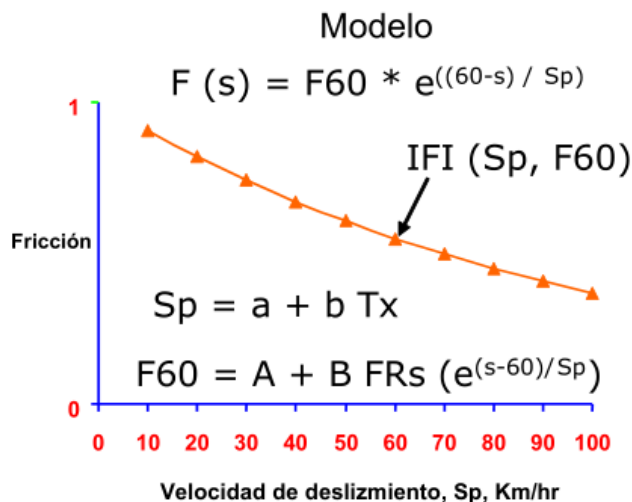
Donde:

$F_{60}$  = La fricción a una velocidad de 60 km/hs. (Calculado con el modelo)

S = Es la velocidad a la que queremos calcular la fricción

$F(S)$  = Es la fricción encontrada a partir de la velocidad S.

**Figura N° 4 Modelo del Índice de Fricción Internacional, según documento PIARC**



**Fuente:** Consideraciones para la aplicación del índice de Fricción Internacional México, 2002.

## 2.6 Método para determinar la macrotextura superficial del pavimento mediante ensayo del círculo de arena (ASTM E-965)

Este método, llamado también ensayo del círculo de arena, describe el procedimiento para determinar la profundidad de la macrotextura de la superficie del pavimento, mediante la aplicación de un volumen conocido de material y la subsecuente medición del área total cubierta por éste. El método está sólo pensado para obtener un valor promedio de la profundidad de textura y no se considera sensible a la microtextura de la superficie del pavimento.

Los pavimentos con importante nivel de textura superficial permitirán un contacto más eficiente (en término de área de contacto) entre neumático y pavimento.

### 2.6.1 Descripción de la prueba del círculo de arena

Este método de prueba (Figura N°5) es adecuado para pruebas de campo el cual determina el promedio del espesor de la macrotextura de la superficie del pavimento.

El conocimiento del espesor de la macrotextura sirve como una herramienta en la caracterización de las texturas superficiales de los pavimentos. Cuando se utiliza en

conjunción con otras pruebas físicas, el espesor de la macrotextura derivada de este método de prueba puede ser utilizado para determinar la capacidad de resistencia al deslizamiento de los materiales en pavimentos o la sugerencia de un mejor acabado.

Cuando se utiliza con otras pruebas, se debe tener cuidado de que todas ellas se apliquen al mismo lugar. Se pueden obtener mejoras en la evaluación del acabado de pavimentos y planes de mantenimiento del uso de este método.

**Figura N° 5 Circulo de arena (ASTM E-965)**



**Fuente:** Seguimiento de tramos de pavimentos asfálticos del tipo cape seal en la iii region, 2008.

Las mediciones del espesor de la textura producidos utilizando este método de prueba se ve influenciada por las características de la macrotextura de la superficie. La forma de la partícula del agregado, tamaño y distribución son características de la textura superficial no tomada en cuenta en este procedimiento. Este método de prueba no intenta proporcionar una calificación completa de las características de la textura superficial.

Los valores del espesor de la macrotextura superficial en el pavimento determinados por este método, con el material y procedimientos establecidos aquí, no necesariamente concuerda o se correlaciona directamente con otras técnicas de medición de textura superficial. Este método también es adecuado para propósitos de investigación y desarrollo, en donde se realizan comparaciones entre superficies de pavimento en la misma evaluación.



La superficie del pavimento a ser muestreado utilizando este método de prueba debe estar seca y libre de cualquier residuo de construcción, escombros superficiales, y partículas agregadas sueltas que se pudieran remover o desplazar durante condiciones ambientales y de servicio normales.

### **2.6.2 Procedimiento**

- Área de muestra

Inspeccione la superficie del pavimento a ser evaluada y seleccione un área seca y homogénea que no tenga singularidades tales como grietas o juntas. Limpie completamente la superficie utilizando las escobillas para remover todos los residuos o material suelto en la superficie. Coloque la caja protectora para viento alrededor del área a ensayar.

- Material de muestra

Llene el cilindro de volumen conocido con material seco y golpee suavemente la base de éste mientras lo llena. Agregue más material hasta llenar el cilindro hasta el tope, y posteriormente enráselo con una regla. Si dispone de una balanza de laboratorio, determine la masa de material dentro del cilindro y procure utilizar esta cantidad en cada uno de los ensayos.

- Medida del ensayo

Vacíe el volumen o masa de material sobre la superficie limpia dentro del área protegida al viento. Cuidadosamente esparza el material en forma circular con el disco plano, utilizando su lado de goma para estos efectos, llenando las cavidades de la superficie a ras con las crestas de los áridos de la capa de rodadura. Mida y registre el diámetro del área cubierta por el material tomando cinco medidas igualmente espaciadas sobre el círculo. Calcule y registre el promedio de las cinco medidas.

Para superficies muy lisas donde el diámetro del parche de material esparcido es mayor a 305 mm, es recomendable reducir a la mitad el volumen de material a utilizar.

### 2.6.3 Equipo

Material Esferas de vidrio sólido con 90% de redondez de acuerdo con el método de prueba ASTM D 1155 o podría utilizarse arena graduada de tal manera que tengan un mínimo de 90% en peso que pase la malla No. 60 y se retenga en una No. 80.

Recipiente de prueba. Se puede utilizar un recipiente cilíndrico metálico o de vidrio, con volumen interno predeterminado de al menos 1.5 pulgadas cúbicas (25,000 mm<sup>3</sup>), el cual se utilizará para determinar el volumen de arena dispersa.

Herramienta de dispersión. Se deberá utilizar un disco plano duro de aproximadamente 1 pulgada (25 mm) de espesor y 2.5 a 3 pulgadas (60 a 75 mm) de diámetro para dispersar la arena. La parte inferior del disco deberá estar cubierta con un material de hule duro y se puede acoplar un asa conveniente a la parte superior del disco. O si no se cuenta con esta herramienta, puede ser remplazada por una regleta, lo suficientemente larga para abarcar el diámetro formado por la arena dispersa.

Brochas. Se deberán utilizar una brocha de alambre y una de cerdas suaves se deberán utilizar para limpiar completamente a la superficie del pavimento antes de la aplicación del material de prueba.

Pantalla contra viento. Se utiliza para proteger al material del viento y la turbulencia creada por el tráfico.

Escala. Se deberá utilizar una escala estándar (regla o cinta métrica) de 12 plg. (305 mm) o de longitud mayor que contenga divisiones de 0.1 plg. (2.5mm) o 1 mm (0.04 plg.).

Utilice una balanza de laboratorio, con sensibilidad de 0.1 g, se recomienda con este método de prueba para proporcionar un control adicional y para asegurar que la cantidad de material utilizado para cada medición del espesor de la macrotextura es igual tanto en masa como en volumen.

#### 2.6.4 Cálculo

Volumen del cilindro – Calcule el volumen interno del cilindro de prueba como sigue:

$$V = \frac{\pi * d^2 * H}{4}$$

**Donde:**

V = Volumen interno del cilindro (mm<sup>3</sup>),

d = Diámetro del cilindro de prueba (mm), y

H = Altura del cilindro (mm)

Espesor promedio de la macrotextura del pavimento.

Calcule el promedio de la macrotextura de la superficie utilizando la siguiente ecuación:

$$H = Tx = \frac{4 * V}{\pi * d^2}$$

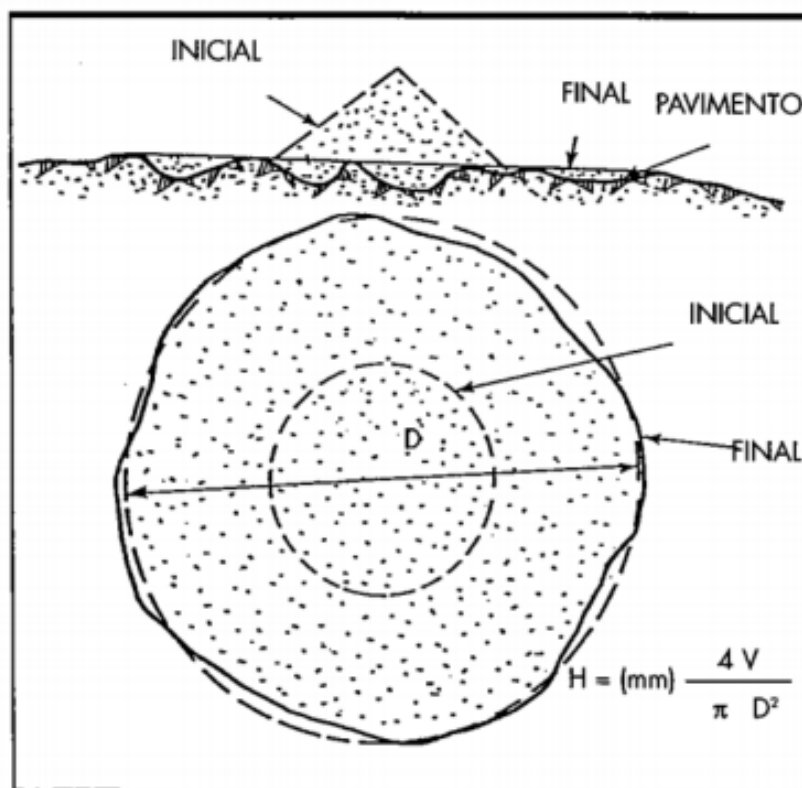
En donde:

H = Tx = Promedio del espesor de la macrotextura de la superficie (mm)

V = Volumen de la muestra (mm<sup>3</sup>)

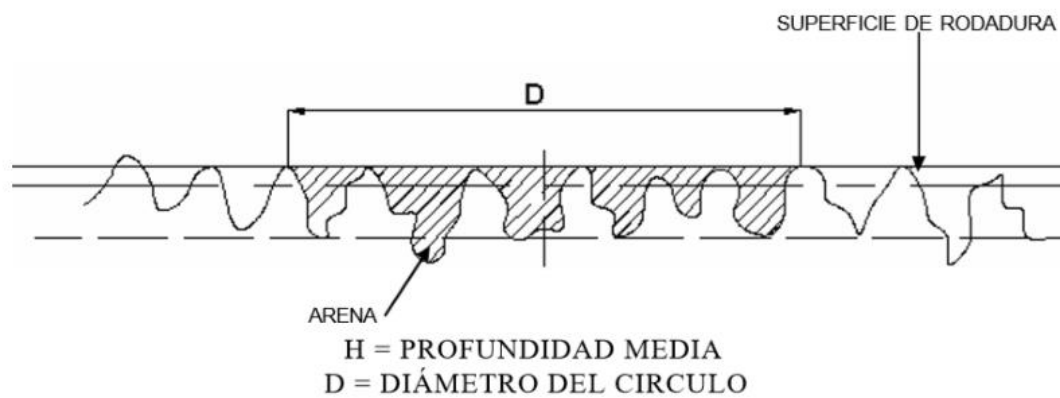
d = Diámetro promedio del área cubierta por el material (mm)

**Figura N° 6 Esquema del ensayo de macrotextura superficial**



**Fuente:** Normativa ASTM E-965

**Figura N° 7 Medición de la macrotextura superficial con técnica volumétrica**



**Fuente:** Normativa ASTM E-965

## 2.6.5 Rangos de Textura

**Tabla N° 9 Textura en pavimentos para el círculo de arena**

<b>Textura</b>	<b>Círculo de arena H (mm)</b>
Muy fina	$H < 0,20$
Fina	$0,20 < H < 0,40$
Media	$0,40 < H < 0,80$
Gruesa	$0,80 < H < 1,20$
Muy gruesa	$H > 1,20$

**Fuente:** Modelo PIARC

## 2.7 Método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento en el pavimento con péndulo británico (ASTM E 274 AASHTO T278-90)

El procedimiento tiene por objeto obtener un Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.D.R) que, manteniendo una correlación con el coeficiente físico de rozamiento, valore las características antideslizantes de la superficie de un pavimento.

Los resultados obtenidos mediante este ensayo no son necesariamente proporcionales o correlativos con medidas de rozamiento hechas con otros equipos o procedimientos

### 2.7.1 Descripción

Este método describe el procedimiento que se debe seguir para la realización de medidas de resistencia al deslizamiento con el Péndulo Británico. El Péndulo Británico es un péndulo dinámico que se utiliza para medir la energía perdida cuando el borde de un patín de goma se desliza sobre una superficie.

El método tiene por objetivo obtener el Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C.D.R.) que valora las características antideslizantes de la superficie de un pavimento.

Los resultados son usados principalmente para los siguientes propósitos:

- Muestreo de la red vial para la gestión de pavimentos.
- Especificaciones para la restauración de la superficie de rodado.
- Especificaciones para nuevas construcciones.

- Investigación de accidentes.
- Medición para mantenciones de invierno en carreteras.

El método de ensayo puede emplearse también para medidas en pavimentos de edificaciones industriales, ensayos de laboratorio sobre probetas, baldosas o cualquier tipo de muestra de superficies planas terminadas. No es el propósito de este método la medida sobre probetas para determinar el pulimento acelerado de los áridos.

**Figura N° 8 Péndulo Británico TRRL**



**Fuente:** skid resistance-friction tester

### **2.7.2 Procedimiento**

#### **Desarrollo en terreno y en lugares de muestreo**

- Se debe seleccionar el lugar a auscultar. Luego se procede a posicionar el equipo en forma longitudinal al camino, nivelándolo gracias a los tornillos que posee en sus tres apoyos guiándose por la burbuja que el equipo tiene.

- Posteriormente se debe limpiar la superficie sobre la cual pasará la zapata, asegurándose de que no queden partículas sueltas. En este instante se debe colocar la galga bajo la palanca de elevación, para mover el brazo en forma vertical de modo que roce ligeramente la superficie a auscultar. De este modo se retira la galga con lo que el brazo quedará presionando la superficie con cierta fuerza. Ahora se debe colocar la regla a modo de corroborar que al mover ligeramente hacia un lado y otro de la posición vertical del brazo, de tal forma que la zapata tome contacto por un borde y el otro a cada lado de las marcas de la regla graduada.
- Una vez realizados los procedimientos anteriores se debe llevar el brazo a la posición horizontal y listo para obturarlo. Luego se moja la superficie que barrerá la zapata con abundante agua. Luego se obtura el botón de accionamiento y se suelta el brazo libremente.
- Se debe registrar la temperatura del agua para cada punto de medición, cada vez que el recipiente se llene con agua nuevamente.
- La aguja indicará el valor obtenido en el ensaye la que debe ser registrada.
- En caso de que sea la primera medición del día se debe calentar previamente la zapata realizando el ensayo como mínimo 3 veces y sin mojar la superficie, antes de la realización de las mediciones.
- Se realizarán 5 mediciones en cada punto, esto podrá extenderse si no se observa que los valores obtenidos fluctúan en un rango que no difiera en más de 5 puntos, de una determinación a otra, de lo contrario se debe proceder a recalibrar el equipo, chequeando la calibración del “0”, hasta lograr que esto ocurra procediéndose a efectuar la medición nuevamente; de lo contrario deben detenerse las mediciones y llevar el equipo a un mantenimiento mayor.
- Debe tenerse en cuenta que no se deben realizar mediciones con este equipo en presencia de lluvia debido a que es posible que los tornillos de calibración del “0” se mojen, imposibilitando al equipo poder calibrarlo y obteniéndose lecturas erróneas al realizar mediciones en estas condiciones.
- Otro factor climático sobre el cual se deben tomar las medidas correspondientes es el viento ya que la aguja no tiene ningún sistema de fijación, más bien trabaja libremente y debido al viento esta altera su recorrido llevando a lecturas erróneas para la medición.

En este caso se debiera considerar la posibilidad de usar algún elemento que impida que el viento llegue directamente sobre el equipo.

- Para efectos de estudios el equipo puede ser posicionado en cualquier dirección ya sea transversal o en algún ángulo determinado según sea el sentido del tránsito.
- Es así como, en los pavimentos con tratamientos de texturado, cepillado o ranurado, es conveniente posicionar el péndulo en  $20^\circ$  respecto del desplazamiento de los vehículos.
- Del mismo modo, si las combinaciones de pendiente y peralte dificultan la nivelación del equipo, éste debe ser dispuesto en un ángulo tal que permita realizarse la medición.
- Ahora bien, las condiciones de temperatura de la superficie del pavimento deben encontrarse en un rango de  $5^\circ\text{C}$  a  $40^\circ\text{C}$ , ya que este efecto altera las mediciones. Esto inhabilita la opción de la determinación de este indicador en pavimentos con escarcha o nieve en su superficie, excepto que se trate de algún estudio en particular.

### **Procedimiento de ensayo**

- El péndulo una vez montado, como se indica en “Montaje del Aparato”, se coloca en el punto de ensayo elegido de modo que la vertical del centro de la zapata coincida con el punto marcado, y que la dirección de barrido sea la elegida. Seguidamente se procede a su nivelación tal como se especifica.

Comprobando el cero del aparato como se indica en el punto 20, se ajusta la altura de la cabeza del péndulo de forma que la zapata de goma en su contacto sobre la superficie del pavimento, recorra una longitud entre 124 y 127 mm. Se deja el brazo del péndulo (D) libre y en su vertical accionando la palanca de elevación (P), con lo que se elevará la zapata de goma. Se baja entonces la cabeza del aparato, sin mover el brazo del péndulo de su posición vertical, hasta que la zapata justamente toque la superficie a medir. Se fija ahora la cabeza del aparato. Se hace oscilar en forma manual el brazo del péndulo hasta que la zapata toque justamente los bordes de la superficie de ensayo, primero a un lado y luego al otro de la vertical. La longitud de rozamiento será la distancia entre los dos bordes de contacto S y S', en el recorrido de la zapata sobre la superficie a medir. La longitud de rozamiento correcta se comprueba usando la regla graduada. Todo roce de la zapata al



moverse a través de la superficie de contacto deberá ser siempre evitado usando la palanca de elevación (P). Siempre que sea preciso, la corrección de la longitud de rozamiento se efectuará mediante una ligera elevación o descenso vertical de la cabeza del péndulo.

- Una vez montado el aparato, comprobada la medida del cero y controlada la longitud de rozamiento de la zapata, se coloca el brazo del péndulo y la aguja indicadora en su posición correcta de disparo.
- La superficie de pavimento a ensayar se limpia con el cepillo que se indica en 12 asegurándose que quede libre de partículas sueltas.
- Antes de efectuar las medidas de ensayo, se humedece la zapata con abundante agua limpia y se moja la superficie del pavimento, extendiendo el agua sobre el área de contacto ayudándose con el cepillo.
- Se procede entonces a la realización de las medidas correspondientes, dejando caer libremente desde su posición de disparo el brazo del péndulo que arrastra la aguja, anotándose la lectura marcada por ésta, en la escala (K) y redondeando al número entero más próximo. Después de cada disparo y medida, el brazo del péndulo y la aguja se vuelven a su posición de disparo. La medida se repite cuatro veces sobre cada punto de ensayo y operando siempre en las mismas condiciones, volviendo a mojar con agua a la temperatura ambiente la superficie de ensayo antes de cada disparo. Si las lecturas de las cuatro medidas no difieren en más de tres unidades, se anotan los valores medidos como valor efectivo de la lectura en el punto ensayado. Si la diferencia entre las 4 lecturas es mayor de 3 unidades BPN (British Pendulum Number), se continúa realizando medidas hasta que tres consecutivas den la misma lectura, en cuyo caso se toma ésta última secuencia como valor efectivo de las lecturas en el punto ensayado.
- Se mide la temperatura ambiente en el punto de ensayo, colocando el termómetro próximo sobre el pavimento y a la sombra. Asimismo, se anota la temperatura del agua, cuyo recipiente debe estar a la intemperie durante la ejecución del ensayo.
- Después de un determinado número de mediciones efectuadas con el péndulo, 5 a 6 puntos de ensayo, se debe realizar una nueva comprobación del cero.

**Tabla N° 10 Registro de mediciones con péndulo británico**

<b>Proyecto:</b>						
<b>Fecha:</b>		<b>Operador:</b>				
<b>Registro (BPN)</b>						<b>Observaciones</b>
<b>Progresiva</b>	<b>T(°C)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	

**Fuente:** Volumen 4: Ensayos de suelos y materiales, A.B.C.

### **Procedimiento de Evaluación**

Deben distinguirse los controles de tipo receptivos y los de estudio, esto debido a que en ambos existen consideraciones especiales.

Con respecto a la cantidad de puntos a auscultar, ésta dependerá de la longitud del tramo, de los sectores homogéneos y del estudio que se quiera efectuar.

Este indicador deberá cumplir con los mínimos exigidos en todo el ancho de la pista, aunque, para efectos de recepción, se determinará como espacio muestral prioritario el sector de las huellas, principalmente la huella externa o derecha según el desplazamiento de los vehículos.

Para el caso de la realización de estudios se aconseja la siguiente metodología para la obtención de la fricción del sector experimental. Se debe realizar una inspección visual del lugar con el fin de determinar los sectores uniformes. Si el tramo experimental es mayor a 5 km se recomienda realizar 4 mediciones por km/pista, si es menor que 5 km se recomienda un punto cada 100 m; cabe señalar que éstas son sólo recomendaciones y para efectos de estudio puede variar la densidad de puntos a auscultar.

Para los controles de tipos receptivo, en contratos tradicionales y concesionados en vías interurbanas, se deberán tomar 10 puntos por km/pista posicionando el péndulo en la huella derecha de la pista. Por su parte, en proyectos urbanos, deberá tomarse 20 puntos por Km./pista.

Así se determina el valor de la fricción en este punto. Se hace hincapié que este parámetro es adimensional, por lo que se adopta en este caso como unidad la característica del equipo

con que se controla, en este caso es BPN, “British Pendulum Number”, cuya traducción al castellano es Número de Péndulo Británico y con que se identificará el valor de la fricción obtenido con este equipo.

### **2.7.3 Equipo**

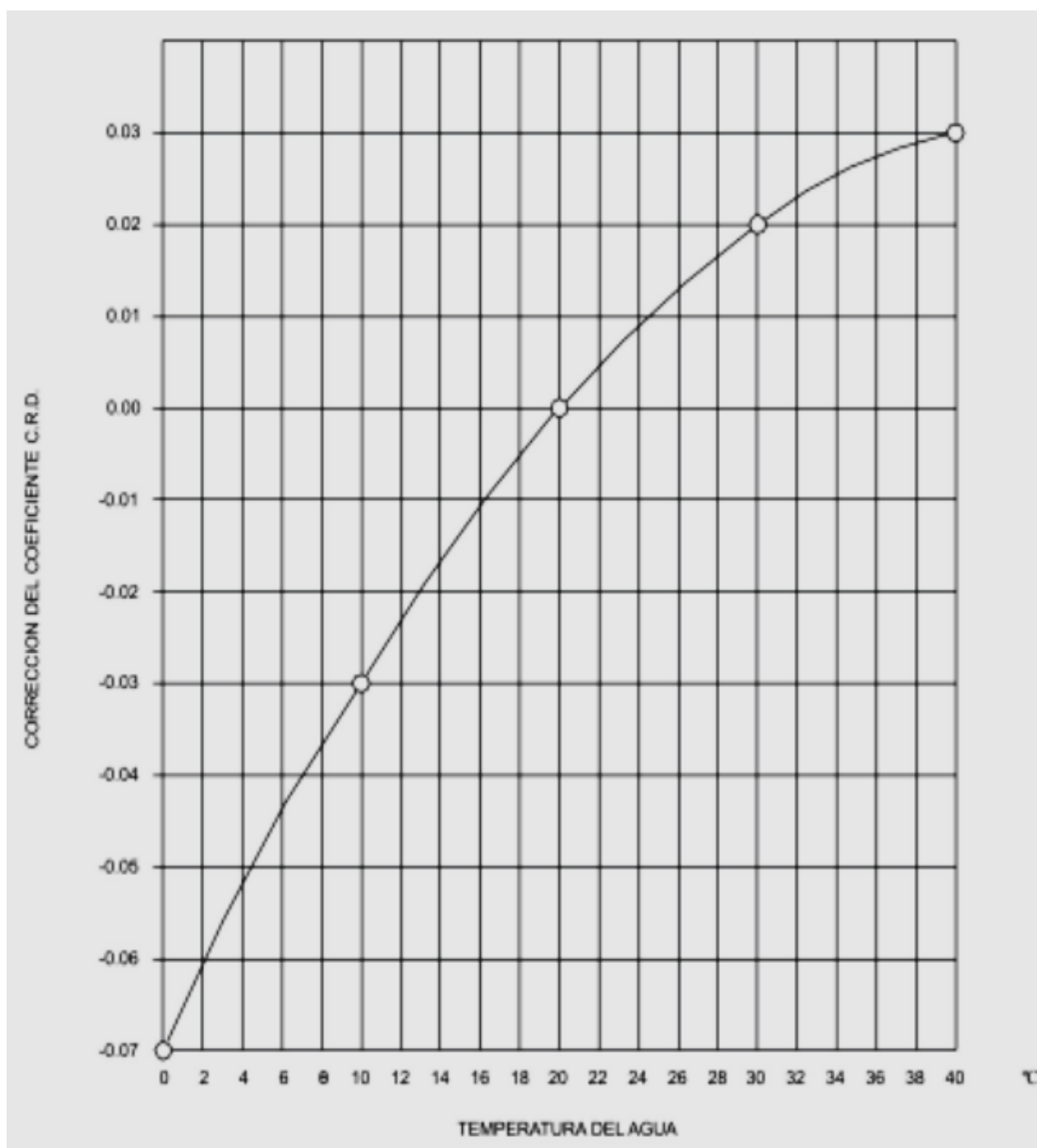
Se utiliza el péndulo británico o también conocido como Péndulo del TRRL (Transport and Road Research Laboratory), una regleta graduada, termómetro, recipientes para agua, cepillo, cinta métrica.

### **2.7.4 Cálculo**

El coeficiente de resistencia al deslizamiento es obtenido de la siguiente manera:

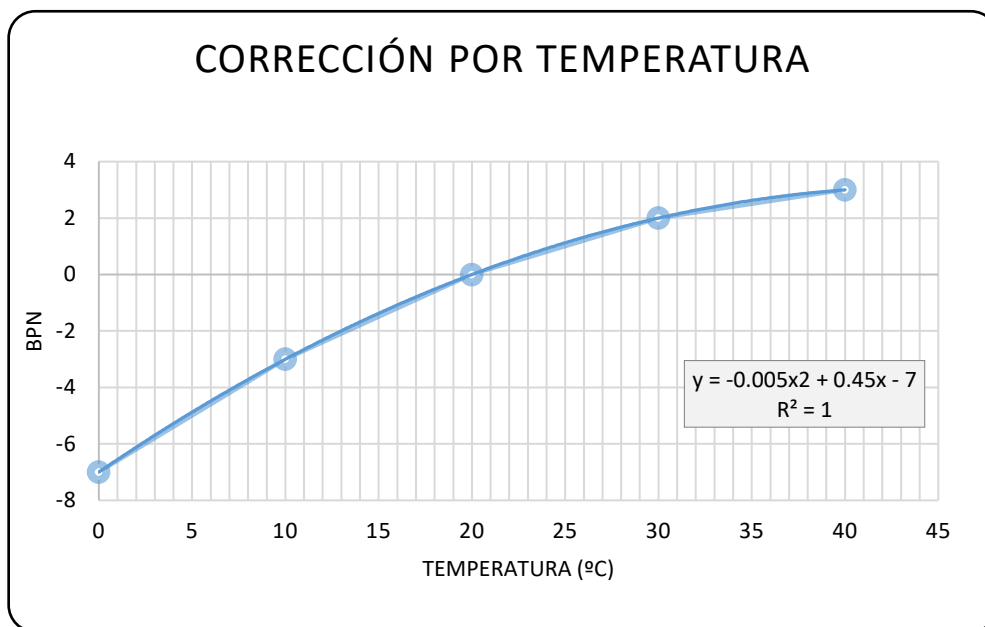
$$c.d.r = \frac{Lectura\ Efectiva + Fc_{20^{\circ}}}{100}$$

Las medidas efectuadas sobre el pavimento están siempre afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada; es por esto, que al valor obtenido del péndulo se le adiciona un factor a la lectura efectiva. Por ejemplo, si obtenemos una lectura de promedio de 78 y tenemos una temperatura de 30°C, le adicionaremos a 78 el factor de 2 y tendremos 80.

**Gráfico N° 1 Corrección de temperatura**

**Fuente:** Volumen 4: Ensayos de suelos y materiales, ABC.

Gráfico N° 2 Fórmula para calcular Fc20°



**Fuente:** Normas ASTM

### 2.7.5 Rangos de Fricción

Después de diversas mediciones realizadas en distintos tipos de superficies, nace la siguiente sugerencia, la cual puede estar sujeta a cambios, según se incremente la experiencia. Para valores de fricción con péndulo británico en pavimento mojado (condición crítica) es propuesto lo siguiente:

**Tabla N° 11 Valores de fricción con Péndulo Británico**

<b>Fricción</b>	<b>Calificación</b>
<0,50	Malo (Deslizamiento del vehículo)
0,51-0,60	De regular a bueno
0,61-0,80	Bueno
0,81-0,90	De bueno a regular
>0,91	Malo (Desgaste de los neumáticos)

**Fuente:** Modelo PIARC

## 2.8 Relación entre variables

La correlación es una medida de la relación (covariación) lineal entre dos variables cuantitativas continuas (x, y). La manera más sencilla de saber si dos variables están correlacionadas es determinar si covarían (varían conjuntamente). Es importante hacer notar que esta covariación no implica necesariamente causalidad, la correlación puede ser fortuita (Vinuesa, 2016).

### 2.8.1 La Estadística Descriptiva

Es el estudio de los métodos para reunir, clasificar, presentar y describir a un conjunto de datos. Se asume que es descriptivo el estudio de un conjunto de datos, cuando simplemente se describen o analizan a los datos.

#### 2.8.1.1 La Media Aritmética

En la práctica la medida de posición de mayor uso y más conocida es la Media Aritmética, a la Media Aritmética se la conoce directamente como Media o Promedio, la Media Aritmética es una medida de tendencia central.

De un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , se denota  $\bar{X}$  a su Media aritmética y se define como la suma de todos los valores observados en la Muestra, dividida entre el número total de datos  $n$ .

$$\bar{X} = M_{(X)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} = \frac{\sum X}{n}$$

#### 2.8.1.2 La Mediana

Es otra de las medidas de posición de amplio uso y de fácil comprensión.

La mediana que se denota por  $M(X)$  o por  $\bar{A}$  se define como el valor central de un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , donde los datos están ordenados correlativamente.

Cuando se tiene de un número impar de datos la Mediana será el valor del dato central

$(n+1)/2$ ; Para un número par de datos se calcula la Media de los datos centrales:  $X_{n/2}, X_{n/2+1}$ .

### 2.8.1.3 La Moda

Otra medida de posición de amplio uso es la Moda, que sin imaginarlo se usa frecuentemente.

En un conjunto de datos  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  de tamaño  $n$ , de una variable o característica  $X$ , la Moda se define como el valor que ocurre con mayor frecuencia, se denota por  $Mo(X)$ . En algunos conjuntos de datos, la Moda puede no existir, o no ser única en otros casos.

### 2.8.1.4 El Rango

El rango es un valor numérico que indica la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de una población o muestra estadística.

Para calcular el rango de una muestra o población estadística utilizaremos la siguiente fórmula:

$$R = X_{max} - X_{min}$$

Donde:

$R$  = Es el rango.

$X_{máx}$  = Es el valor máximo de la muestra o población.

$X_{mín}$  = Es el valor mínimo de la muestra o población estadística.

$X$  = Es la variable sobre la que se pretende calcular esta medida.

### 2.8.1.5 La Varianza

Es la principal medida de dispersión, es la más precisa y de mayor uso, en especial su uso es más amplio en la Estadística inferencial.

Dependiendo de si los datos corresponden a una población o a una muestra, se obtendrán la Varianza poblacional o la Varianza muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Varianza de una población o Varianza poblacional se designa por  $\sigma^2$  (Sigma cuadrado), la Varianza de una muestra o Varianza muestral se designa por  $s^2$

Para una ordenación de datos:  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  La Varianza se calcula como:

$$\text{Varianza Poblacional} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} = \overline{(X - \mu)^2}$$

$$\text{Varianza Muestral} \quad s^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{n \sum X^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}$$

Donde la Media Aritmética de una población y de una Muestra respectivamente son  $\mu, \bar{X}$  (Su modo de cálculo es el mismo), se toma en cuenta que el total de datos se representa por  $N, n$  para una población o muestra respectivamente.

### 2.8.1.6 Desviación Estándar

Con base en la Varianza, otra medida de dispersión es la Desviación Estándar, o Desviación Típica. Según se trabaje con una población o con una muestra, se obtendrán la Desviación Estándar poblacional o la Desviación Estándar muestral, cuyas definiciones son ligeramente diferentes.

La Desviación Estándar de una población se designa por  $\sigma$  (Sigma). La Desviación Estándar de una muestra se designa por  $s$ . Son las raíces cuadradas de las Varianzas de una población o muestra respectivamente, por tanto:

Para una ordenación de datos:  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  La Desviación Estándar se calcula por:

$$\text{Desviación Estándar Poblacional} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \mu)^2}{N}} = \sqrt{\overline{(X - \mu)^2}}; N = \sum_{j=1}^k f_j$$

$$\text{Desviación Estándar Muestral} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\overline{(X - \bar{X})^2}}; n = \sum_{j=1}^k f_j$$

Donde  $\mu, \bar{X}$  son la Media Aritmética de una población o de una muestra (Poseen el mismo valor).



## 2.8.2 Análisis de correlación

Se asume de que existe correlación entre dos variables, cuando es evidente que al variar una de ellas también se produce variación de la otra. Cuando se trata de medir cuán dependiente es una variable de la otra, se emplea El ANÁLISIS DE CORRELACIÓN que trata de establecer el grado de relación entre dos variables. (Chungara, 2015).

- Se llama Correlación simple cuando se trata de la relación entre dos variables. A la relación entre tres o más variables se llama Correlación múltiple.
- Se llama Correlación lineal cuando la relación entre dos variables se representa por una Recta. Si la relación se representa por una curva cualquiera (No Recta), se tiene la correlación no lineal.

Trazando su Diagrama de dispersión, es posible observar la tendencia que muestra un conjunto de puntos, para concluir razonablemente cuál es el tipo de correlación que muestran.

### 2.8.2.1 Correlación lineal y regresión lineal simple

La correlación lineal y la regresión lineal simple son métodos estadísticos que estudian la relación lineal existente entre dos variables. Antes de profundizar en cada uno de ellos, conviene destacar algunas diferencias:

- La correlación cuantifica como de relacionadas están dos variables, mientras que la regresión lineal consiste en generar una ecuación (modelo) que, basándose en la relación existente entre ambas variables, permita predecir el valor de una a partir de la otra.
- El cálculo de la correlación entre dos variables es independiente del orden o asignación de cada variable a X e Y, mide únicamente la relación entre ambas sin considerar dependencias. En el caso de la regresión lineal, el modelo varía según qué variable se considere dependiente de la otra (lo cual no implica causa-efecto).
- A nivel experimental, la correlación se suele emplear cuando ninguna de las variables se ha controlado, simplemente se han medido ambas y se desea saber si están relacionadas. En el caso de estudios de regresión lineal, es más común que

una de las variables se controle (tiempo, concentración de reactivo, temperatura...) y se mida la otra.

- Por norma general, los estudios de correlación lineal preceden a la generación de modelos de regresión lineal. Primero se analiza si ambas variables están correlacionadas y, en caso de estarlo, se procede a generar el modelo de regresión.

La correlación lineal entre dos variables, además del valor del coeficiente de correlación y de su significancia, también tiene un tamaño de efecto asociado. Se conoce como *coeficiente de determinación*  $R^2$ . Se interpreta como la cantidad de varianza de Y explicada por X.

La Regresión Lineal es una técnica paramétrica utilizada para predecir variables continuas, dependientes, dado un conjunto de variables independientes. Es de naturaleza paramétrica porque hace ciertas suposiciones basadas en el conjunto de datos. Si el conjunto de datos sigue esas suposiciones, la regresión arroja resultados increíbles, de lo contrario, tiene dificultades para proporcionar una precisión convincente.

Matemáticamente, la regresión usa una función lineal para aproximar o predecir la variable dependiente dada como:

$$y = a * x + b$$

Donde:

y = Es la variable dependiente o la variable a predecir.

x = Es la variable independiente o la variable que usamos para hacer una predicción.

a = Es la pendiente o el valor que debe ser determinado, se le conoce como coeficiente y es una especie de magnitud de cambio que pasa por y cuando x cambia.

b = Es la constante que debe ser determinada, se le conoce como intercepto porque cuando x es igual a 0, entonces y = b.

Esta es la ecuación de Regresión Lineal Simple. Se llama simple porque solo hay una variable independiente involucrada, que vendría siendo “x”.

El análisis de regresión engloba a un conjunto de métodos estadísticos que usamos cuando tanto la variable de respuesta como la la(s) variable(s) predictiva(s) son continuas y queremos predecir valores de la primera en función de valores observados de las segundas. En esencia, el análisis de regresión consiste en ajustar un modelo a los datos, estimando coeficientes a partir de las observaciones, con el fin de predecir valores de la variable de respuesta a partir de una (regresión simple) o más variables (regresión múltiple) predictivas o explicativas.

El análisis de regresión juega un papel central en la estadística moderna y se usa para:

- **Identificar** a las variables predictivas relacionadas con una variable de respuesta
- **Describir** la forma de la relación entre estas variables y para derivar una función matemática óptima que modele esta relación
- **Predecir** la variable de respuesta a partir de la(s) explicativas o predictoras

#### 2.8.2.2 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación es la medida específica que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación. En los informes de correlación, este coeficiente se simboliza con la  $r$ . Para medir el grado de relación existente entre variables, se usa el Coeficiente de correlación. (Chungara, 2015).

Para dos variables, la fórmula compara la distancia de cada dato puntual respecto a la media de la variable y utiliza esta comparación para decirnos hasta qué punto la relación entre las variables se ajusta a una línea imaginaria trazada entre los datos. A esto nos referimos cuando decimos que la correlación examina las relaciones lineales.

Cuando se establece una relación funcional entre las variables  $X$ ,  $Y$  de la forma:

$$Y = f(X).$$

Donde:

$Y$  = Variable dependiente

$X$  = Variable independiente

Asumiendo que, Y es el valor inicial y conocido de la variable dependiente, siendo  $\bar{Y}$  su Media aritmética.  $Y_{est}$  es el valor que se calcula de acuerdo a la relación funcional. Entonces se llama Coeficiente de correlación a:

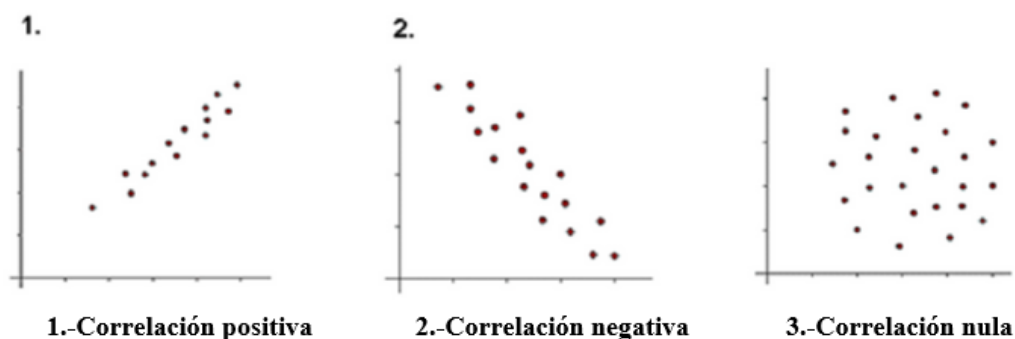
$$r = \sqrt{\frac{\Sigma(Y_{est} - \bar{Y})^2}{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}}$$

Se aprecia que el cálculo de este Coeficiente de correlación requiere que se conozca plenamente la relación funcional entre las variables  $Y = f(X)$ .

El coeficiente de correlación r es un valor sin unidades entre -1 y 1:

- Cuanto más se aproxima r a cero, más débil es la relación.
- Los valores de r positivos indican una correlación positiva, en la que los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos.
- Los valores de r negativos indican una correlación negativa, en la que los valores de una variable tienden a incrementarse mientras que los valores de la otra variable descienden.
- Los valores 1 y -1 representan una correlación "perfecta" positiva y negativa, respectivamente. Dos variables perfectamente correlacionadas cambian conjuntamente a una tasa fija. Decimos que tienen una relación; cuando representados en un gráfico de dispersión, todos los puntos correspondientes a los datos pueden conectarse con una misma línea.

**Figura N° 9 Representación gráfica de cada tipo de diagrama de correlación**



**Fuente:** Estadística, Dr. Mayhuasca

**Tabla N° 12 Interpretación del valor de r**

Valor de r	Interpretación
$\pm 0,00$	Ausencia de correlación
$\pm 0,10$ a $\pm 0,19$	Correlación insignificante
$\pm 0,20$ a $\pm 0,39$	Correlación baja-leve
$\pm 0,40$ a $\pm 0,69$	Correlación moderada
$\pm 0,70$ a $\pm 0,99$	Correlación alta a muy alta
$\pm 1,00$	Función perfecta

**Fuente:** Estadística, Dr. Mayhuasca

### 2.8.2.3 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación:  $r^2$ .

El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado ( $r^2$ ), refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será. (Chungara, 2015).

El coeficiente de determinación ( $r^2$ ) indicará el grado de ajuste que se ha conseguido con ese modelo de ecuación; mientras mayor sea su valor, se podrá considerar que mejor es el modelo planteado para predecir el valor de la variable dependiente (Vila et al, 2001). En la Tabla siguiente se muestran los criterios sugeridos por Pellinen (Pellinen, 2001) para determinar la bondad del ajuste en función del  $r^2$ .

Si el 100% de los datos están sobre la línea de la función de regresión, entonces el coeficiente de determinación será 1.

Por el contrario, si para un conjunto de datos y cierta función de ajuste el coeficiente  $r^2$  resultase ser igual a 0.5, entonces puede decirse que el ajuste es aceptable en un 50%.

**Tabla N° 13 Criterios de bondad de ajuste**

<b>Criterio</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Excelente	$\geq 0,90$
Buena	0,70 – 0,89
Aceptable	0,40 – 0,69
Pobre	0,20 – 0,39
Muy Pobre	$\leq 0,19$

**Fuente:** Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance. Pellinen. (2001)

### **2.8.3 Regresión simple mediante STATGRAPHICS centurión**

El procedimiento de Regresión Simple está diseñado para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor cuantitativo X sobre una variable dependiente Y. Cualquiera de los 27 modelos lineales y no lineales puede ser ajustados usando ya sea el procedimiento de mínimos cuadrados o el procedimiento de estimación resistente. Las pruebas se corren para determinar la significancia estadística del modelo. El modelo ajustado puede ser graficado con límites de confianza y/ o límites de predicción. Los residuos también pueden ser graficados y las observaciones influyentes pueden ser identificadas también.

#### **2.8.3.1 Modelos de calibración**

Se refiere al modelo que va a ser estimado. Todos los modelos mostrados pueden ser linealizados mediante la transformación ya sea de X o de Y o de ambos. Cuando ajusta un modelo lineal, STATGRAPHICS primero transforma los datos, después ajusta el modelo y finalmente invierte la transformación para mostrar los resultados.

Los modelos disponibles son mostrados a continuación:

Tabla N° 14 Modelos de calibración de STATGRAPHICS

Modelo	Ecuación	Transformación en Y	Transformación en X
Lineal	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	Ninguna	Ninguna
Raíz cuadrada de Y	$y = (\beta_0 + \beta_1 x)^2$	Raíz cuadrada	Ninguna
Exponencial	$y = e^{(\beta_0 + \beta_1 x)}$	Logaritmo	Ninguna
Inverso de Y	$y = (\beta_0 + \beta_1 x)^{-1}$	Inverso	Ninguna
Y Cuadrática	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 x}$	Cuadrado	Ninguna
Raíz cuadrada de X	$y = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{x}$	Ninguna	Raíz cuadrada
Raíz cuadrada doble	$y = (\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x})^2$	Raíz cuadrada	Raíz cuadrada
Y Logarítmico- X Cuadrática	$y = e^{(\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x})}$	Logaritmo	Raíz cuadrada
Y Inversa- raíz cuadrada de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x})^{-1}$	Inverso	Raíz cuadrada
Y cuadrática- raíz cuadrada de X	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x}}$	Raíz cuadrada	Raíz cuadrada
X Logarítmico	$y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x)$	Ninguna	Logaritmo
Raíz cuadrada de Y- logaritmo de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 \ln(x))^2$	Raíz cuadrada	Logaritmo
Multiplicativo	$y = \beta_0 x^{\beta_1}$	Logaritmo	Logaritmo
Y Inverso, X logarítmico	$y = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 \ln(x)}$	Inverso	Logaritmo
Y cuadrática - logaritmo de X	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \ln(x)}$	Cuadrado	Logaritmo
Inverso de X	$y = \beta_0 + \beta_1 / x$	Ninguna	Inverso
Raíz cuadrada de Y -inverso de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 / x)^2$	Raíz cuadrada	Inverso
Curva S	$y = e^{(\beta_0 + \beta_1/x)}$	Logaritmo	Inverso
Doble inverso	$y = [\beta_0 + \beta_1 / x]^{-1}$	Inverso	Inverso
Y cuadrática- inverso de X	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 / x}$	Cuadrado	Inversa

X Cuadrática	$y = \beta_0 + \beta_1 x^2$	Ninguna	Cuadrado
Raíz cuadrada de Y- cuadrado de X.	$y = (\beta_0 + \beta_1 x^2)^2$	Raíz cuadrada	Cuadrado
Y Logarítmico- X Cuadrático	$y = e^{(\beta_0 + \beta_1 x^2)}$	Logaritmo	Cuadrado
Y Inverso, X cuadrático	$y = (\beta_0 + \beta_1 x^2)^{-1}$	Inverso	Cuadrático
Doble cuadrático	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 x^2}$	Cuadrado	Cuadrado
Logístico	$y = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x)}}$	Y/(1-y)	Ninguna
Log probit	$y = \varphi(\beta_0 + \beta_1 \ln(x))$	$\varphi^{-1}(y)$ (inv. normal)	Logaritmo

**Fuente:** STATGRAPHICS – Rev. 4/25/2007

Para determinar cuál modelo se ajusta a los datos, el resultado en la ventana Comparación de Modelos Alternativos que se describe abajo puede ser útil, porque ajusta y muestra todos los modelos en orden decreciente de sus R-cuadradas.

### 2.8.3.2 Comparación de modelos de calibración

La ventana Comparación de Modelos Alternos muestra los valores de R-cuadrada obtenidos cuando ajustamos cada uno de los 27 modelos disponibles.

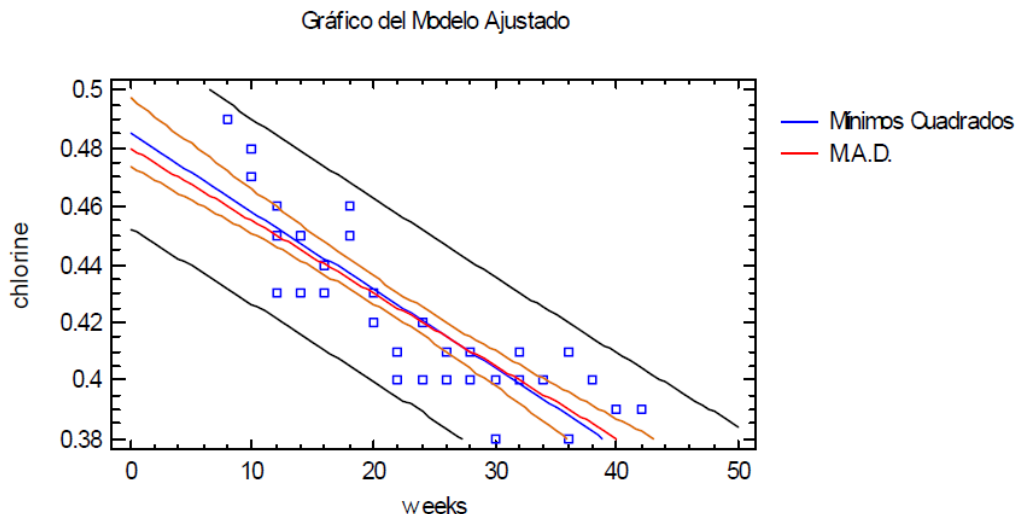
Los modelos están ordenados en orden decreciente de la R-cuadrada. Cuando seleccionamos un modelo alternativo, deben considerarse primero los modelos que se encuentran en la parte superior de la lista. Sin embargo, debido a que el estadístico R-cuadrada fue calculado después de transformar X y/o Y, el modelo con el más alto R-cuadrado puede no ser el mejor modelo. Siempre es recomendable graficar el modelo ajustado para ver si hace un buen trabajo para los datos.

### 2.8.3.3 Gráfico del modelo ajustado

Esta ventana muestra el modelo o modelos ajustados, junto con los límites de confianza y límites de predicción si son requeridos.



Figura N° 10 Modelo del gráfico ajustado



**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

La gráfica incluye:

- La línea del mejor ajuste o **ecuación de predicción:**

Esta es la ecuación que debería ser usada para predecir valores de la variable dependiente Y dados los valores de la variable independiente X.

- **Intervalos de Confianza** para la respuesta media de X. Se refiere a las bandas internas de la gráfica mostrada arriba. Los intervalos internos describen que tan adecuadamente ha sido estimada la ubicación de la línea dada la muestra de datos disponible. Conforme el tamaño de la muestra  $n$  incrementa, esas bandas se ajustarán mejor. Es posible notar que la amplitud de las bandas varía como una función de X y la línea estimada se acerca más al valor promedio de  $x$ .

- **Límites de predicción para nuevas observaciones.** Éstas son las bandas externas de la gráfica y describen que tan exacta sería una predicción de un nuevo valor. Sin importar el tamaño de la muestra, las observaciones nuevas variarán alrededor de la línea verdadera con una desviación estándar igual a  $\sigma$ .

## 2.9 Conclusiones parciales

- La importancia del estudio de la textura superficial y el coeficiente de resistencia al deslizamiento está dada por formar una parte importante de las carreteras, con

su relación directa con la adherencia neumático- pavimento, la velocidad y el tránsito.

- El ensayo del círculo de arena es adecuado para pruebas de campo el cual determina el promedio del espesor de la macrotextura de la superficie del pavimento lo que sirve como una herramienta en la caracterización de las texturas superficiales de los pavimentos.
- A partir del ensayo para determinar la textura que es un ensayo sencillo y económico se puede determinar los valores de fricción a partir del ensayo del péndulo británico de fricción y con esta determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento.
- Se establece la metodología general de trabajo para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la textura superficial usando los ensayos descritos en los manuales de la ABC (Administradora boliviana de carreteras), y se estableció que la situación más crítica de funcionamiento sería con presencia de agua en la capa de rodadura del pavimento; si no existe una buena macrotextura la evacuación del agua no sería satisfactoria, incidiendo así en la fricción.
- La correlación trata de establecer la relación o dependencia que existe entre las dos variables que intervienen en una distribución bidimensional. Es decir, determinar si los cambios en una de las variables influyen en los cambios de la otra. En caso de que suceda, diremos que las variables están correlacionadas o que hay correlación entre ellas, si esto no sucede diremos que existe una correlación nula entre ellas.
- El análisis de correlación produce un número que resume el grado de la correlación entre dos variables; y el análisis de regresión da lugar a una ecuación matemática que describe dicha relación.
- El análisis de correlación generalmente resulta útil para un trabajo de investigación cuando el investigador trata de determinar si dos variables son relacionadas, el interés radica básicamente en la fuerza de la relación. La correlación mide la fuerza de una entre variables; la regresión da lugar a una ecuación que describe dicha relación en términos matemáticos.

## CAPÍTULO III

### RELACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESLIZAMIENTO Y MACROTEXTURA

#### 3.1 Unidades de estudio y decisión muestral

##### 3.1.1 Unidad de estudio

- Puntos de control de coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura del pavimento.

##### 3.1.2 Población

- N= 200 puntos de control de coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura del pavimento.

##### 3.1.3 Muestra

Se usará las fórmulas para población finita.

$$n = \frac{N\sigma^2 Z_\alpha^2}{e^2(N - 1) + \sigma^2 Z_\alpha^2}$$

Dónde:

n = El tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población.

$\sigma$  = Desviación estándar de la población, que generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor estimado a ojo o a partir de una pequeña muestra o muestra piloto. Para ser conservador (prudente), mejor errar estimando por exceso que por defecto.

$Z_\alpha$ : Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante que, si no se tiene su valor, se lo toma en relación al 95% de confianza equivale a 1,96 (como más usual) o en relación al 99% de confianza equivale 2,58, valor que queda a criterio del encuestador.

e = Límite aceptable de error maestral que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09), valor que queda a criterio del encuestador.

**Datos:**

$$N = 200$$

$$\sigma^2 = 0,12$$

$$Z\alpha = 1,96$$

$$e = 0,05$$

$$n = \frac{1,96^2 * 200 * 0,12}{(200 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 * 0,12}$$

$$n = 96,19 \approx 98$$

**entonces:**

$n = 98$ ; se deberá realizar 98 puntos de control de coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura del pavimento para tener una confiabilidad del 95% que los resultados son ciertos.

**3.1.4 Selección de las técnicas de muestreo**

**Muestreo estratificado proporcional:** Es cuando existe proporcionalidad entre el tamaño de la muestra de cada estrato con la muestra seleccionada.

**Tabla N° 15 Muestreo estratigráfico**

Nivel o estrato	N° de mediciones	Porcentaje (%)	frecuencia
puntos de control de coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura	200	100	98x1,00=98
total	200	100	98

**Fuente:** Elaboración propia

## **3.2 Métodos y técnicas empleadas**

### **3.2.1 Métodos**

Para este proyecto se usará el método empírico y método teórico.

Por parte del método empírico se realizará la observación y medición de las variables mediante los ensayos que están planteados en el VOLUMEN 4. ENSAYOS DE SUELOS Y MATERIALES de los manuales técnicos para el diseño de carreteras en Bolivia.

El contenido de este volumen está constituido por normas y procedimientos que no deben cambiarse bajo ninguna circunstancia. En especial, los ensayos de laboratorio deben ajustarse exactamente a los procedimientos y criterios que se indican. Cualquier alteración de los mismos obliga a anular el resultado obtenido, pues imposibilita su comparación con otras especificaciones y resultados obtenidos de otros ensayos.

El contenido de este manual es una recopilación de normas ya establecidas y desarrolladas por organismos especializados. En el título de cada método se incluyó el nombre de las normas base.

- **A0804. Método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento en el pavimento con péndulo británico (TRRL) (ASTM E-274)**
- **A0805. Método para determinar la textura superficial del pavimento mediante ensayo del círculo de arena (ASTM E-965)**

Para el análisis estadístico y la relación de las variables estudiadas se usarán los programas:

- IBM SPSS Statistics Visor versión 26,0
- Statgraphics Centurión V 16.103 español

SPSS «Startical Product and Service Solutions» es un conjunto de herramientas de tratamiento de datos para el análisis estadístico, Al igual que el resto de aplicaciones que utilizan como soporte el sistema operativo Windows el SPSS funciona mediante menús desplegables, con cuadros de diálogo que permiten hacer la mayor parte del trabajo simplemente utilizando el puntero del ratón, Este software proporciona herramientas que

permiten a los usuarios consultar datos y formular hipótesis de pruebas adicionales de forma rápida, así como ejecutar procedimientos para ayudar a aclarar las relaciones entre variables

STATGRAPHICS Centurión XVIII es una herramienta de análisis de datos de gran alcance que combina una amplia gama de procedimientos con brillantes gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis de datos. Está diseñado con funciones avanzadas de estadística, lo suficientemente significativas para ser usado por expertos y que, mediante una interfaz increíblemente intuitiva proporciona la simplicidad suficiente para que un analista novel pueda realizar procedimientos complejos.

### **3.2.2 Técnicas**

El presente trabajo se maneja dentro de dos técnicas de investigación, documental y de campo.

Es una investigación documental puesto que se realiza apoyándose en fuentes de tipo documental, esto es, en documentos de cualquier especie, basados en principios científicos o de investigación objetiva. Como subtipos de esta investigación están la investigación bibliográfica, donde obtenemos la información recogiéndola de libros; la hemerográfica a partir de artículos y ensayos; y la archivística obtenida, como su nombre lo indica, de archivos, como cartas, oficios, circulares y expedientes.

Es también una investigación de campo, puesto que queremos visualizar el fenómeno a estudiar en el lugar donde se desarrollan los actos.

### **3.3 Localización del tramo**

El tramo de estudio Tomatitas-Erquis cuenta con cinco kilómetros estudiados, se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, provincia Méndez, distrito 2 Tomatitas.

El inicio del tramo está ubicado en el Colegio de Tomatitas y concluye en la comunidad de Erquis Sud.

**Figura N° 11 Provincia Méndez**



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N° 12 Foto Satelital mediante Google Earth**



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.1 Coordenadas Geográficas y UTM

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas geográficas de inicio y fin del tramo seleccionado.

**Tabla N° 16 Coordenadas geográficas del tramo**

Descripción	progresiva	latitud	longitud	Altura (m.s.n.m)
Colegio de Tomatitas	0+000	21°29'54,03'' S	64°45'50,18'' O	1927
Erquis Sud	5+000	21°28'38,31'' S	64°46'50,82'' O	2060

**Fuente:** Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestra las coordenadas UTM (en inglés Universal Transverse Mercator) de inicio y fin del tramo seleccionado.

**Figura N° 13 Coordenadas UTM del tramo**

Descripción	Progresiva	Coordenada X	Coordenada Y	Zona
Colegio de Tomatitas	0+000	317270,29 m E	7621639,03 m S	20 K
Erquis Sud	5+000	313770,88 m E	7623956,21 m S	20 K

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.2 Características del área de estudio

#### 3.3.2.1 Clima y temperatura

El clima de la región es templado semiárido y varía muy poco en relación a las estaciones del año que correspondan, siendo su temperatura ambiente media igual a **19,12 °C**. Podemos indicar también que las precipitaciones pluviales son abundantes entre los meses de noviembre y abril.

La precipitación es la caída del agua, en forma líquida o sólida, sobre la superficie de la tierra. La precipitación se origina cuando el vapor de agua de la atmósfera se enfría y condensa para formar gotitas que se agrupan en forma de nubes. Un mayor enfriamiento ocasiona, por coalescencia, la unión de estas gotitas para formar las gotas de agua, la zona del estudio presenta una precipitación promedio de **684,0 mm/m<sup>2</sup>**.

**Fuente:** SENAMHI



### 3.3.2.2 Vegetación

La vegetación nativa es descrita combinando la fisiografía, clima y altura. En cada lugar se observa tres formaciones de vegetales: bosque, matorral y vegetación herbácea. Además, se incluye las áreas de agricultura y plantaciones forestales.

Se observa que las características geomorfológicas, hídricas, de clima, y de alturas, han determinado la evolución de una cobertura vegetal dispersa, adaptada a factores limitantes. A esto hay que añadir la influencia, marcada, antrópica que paulatinamente han modificado la vegetación nativa, a las actuales condiciones.

En total se han identificado 200 especies, distribuidas en 25 familias botánicas, lo que demuestra su importancia de biodiversidad florística. Las familias de mayor a menor proporción son Gramíneas y leguminosas. Los tipos de vegetación se pueden observar en la siguiente tabla:

**Tabla N° 17 Especies nativas de flora**

Nombre común	Nombre científico
Menta del campo	Aloysia gratissima
Malva	Malvastrum sp
Ají de monte	Capsicum sp
Churqui	Acacia Caven
Sauce criollo	Salix humboltiana
Curqui	Acacia cavenia
Molle	Schinus molle

**Fuente:** Dirección de Planificación – Gobernación

## 3.4 Información del tramo

### 3.4.1 Acta de recepción definitiva de obra por administración directa

**LUGAR Y FECHA:** Erquis Oropeza 23 de octubre del 2015

**OBRA:** PROYECTO CONSTRUCCIÓN OBRAS DE CONCLUSIÓN "CAMINO  
TOMATITAS - EQUIS NORTE - ERQUIS CEIBAL -CR. CADILLAR

**UBICACIÓN:** PROVINCIA MÉNDEZ

**EJECUTADO:** POR ADMINISTRACIÓN DIRECTA SEDECA - TARIJA

**SUPERVISIÓN Y FISCALIZACIÓN:** SEDECA- TARIJA

**FECHA DE INICIO:** 1 DE OCTUBRE 2014

**FECHA DE CONCLUSIÓN FÍSICAMENTE:** 23 DE OCTUBRE 2015

**PLAZO DE EJECUCIÓN:** 390 DÍAS

**COSTO TOTAL DE LA OBRA:** 22 112 132,53 bolivianos (Veinte Dos Millones Ciento Doce Mil Ciento Treinta y Dos 53/100 bolivianos)

### **3.4.2 Características del proyecto**

Longitud de 15.978 km y se divide en tres tramos.

- **Tramo 1A (Tomatitas – Erquis Norte) Avance físico en dicho tramo 100%**

**Longitud:** 7,671 Km

**Ancho de carril:**

De 00+000 a 01+310	7.0 metros (con cordones)
De 01+310 a 07+670	7.0 metros (con bermas 1 macada lado)

**Superficie:** Concluido a nivel de carpeta asfáltica con un espesor e=5 Cm y bermas de tratamiento simple y tiene una ejecución física del 100%

**Drenaje:** Construcción muro de Contención de 2km teniendo un avance físico del 100%, cunetas concluido y un Puente losa en la progresiva 0+040 un avance físico 100%

**Señalización Vertical y Horizontal**

Concluido tiene un avance físico del 100 %

- **Tramo 1b (Erquis Norte - Erquis Sud-Cruce Cadillar) Avance físico en dicho tramo 100%**

**Longitud:** 6,318 Km.

**Ancho de carril:**

De 07+7670 a 14+080      7.0 metros (con bermas 1 m a cada lado)

**Superficie:** Concluido a nivel de carpeta asfáltica con un espesor e=5 Cm y bermas de tratamiento simple y tiene una ejecución física del 100%

**Drenaje:** Se construyó cunetas, muros de contención y tiene un avance físico del 100%

**Señalización Vertical y Horizontal**

Concluido tiene un avance físico del 100%

- **Tramo 2 (Erquis Norte - Erquis Ceibal) Avance físico en dicho tramo 100%**

**Longitud:** 1,800 Km.

**Ancho de carril:**

4.0 metros y Ancho de Berma a cada lado de 1 m con carpeta Asfáltica

**Superficie:** Concluido a nivel de carpeta asfáltica con un espesor de 4 cm y tiene un avance físico 100%

**Drenaje:** Cunetas Concluido 100%

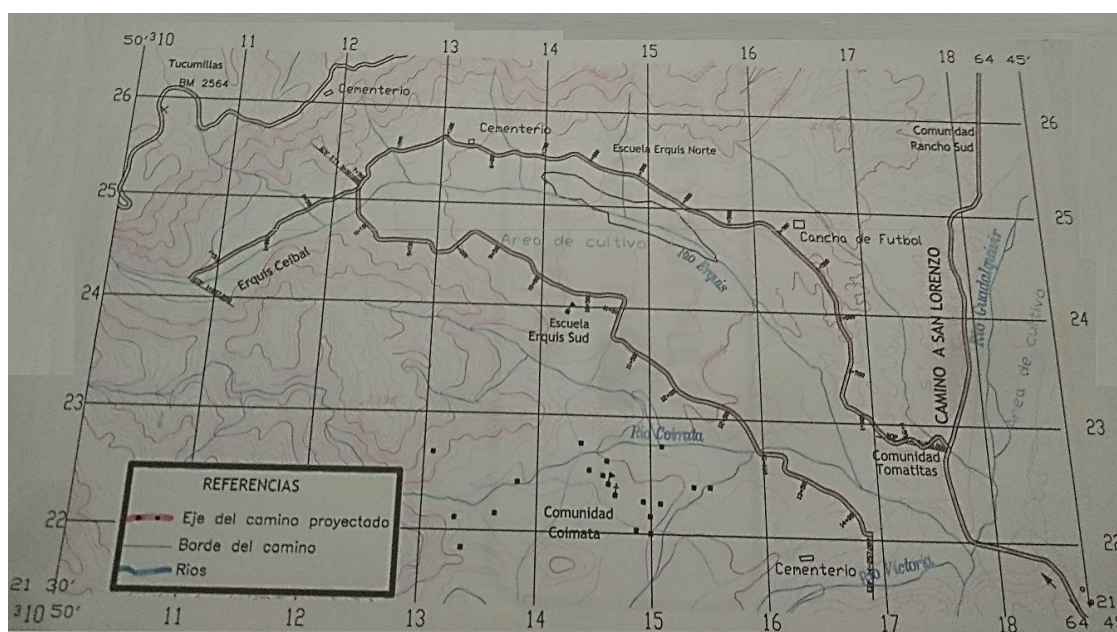
Señalización Vertical y Horizontal: Concluido en un 100% físicamente

Luego de recorrer en forma conjunta los tramos, ubicado entre las progresivas Km 0+000 hasta et Km 15+978 se verifico que los trabajos están debidamente ejecutados y terminados, conforme a especificaciones técnicas y proyecto elaborado.

Por tanto, en el lugar del emplazamiento de lo obra, siendo las 10:30 horas del día Viernes 23 octubre del 2015 con asistencia de las autoridades del **SEDECA** y de las **Comunidades Beneficiarias**, se firma el Acta, con objeto de llevar a cabo la **RECEPCIÓN DEFINITIVA DE OBRA** haciéndose constar:

Que los asistentes han realizado un reconocimiento detallado de la obra coincidiendo que se encuentra en buen estado y que ha sido ejecutada de acuerdo con el Proyecto y especificaciones técnicas, teniendo en cuenta todas las prescripciones en vigor. y que se encuentra en condiciones de ser recibida.

**Figura N° 14 Plano de Ubicación Proyecto “Asfaltado Erquis Norte-Cruce Cadillar”**



**Fuente:** Servicio departamental de caminos (SEDECA)

La carretera “**Tomatitas-Erquis Norte-Erquis Ceibal- Cr. Cadillar**”, constituye parte de los caminos municipales más importantes para el desarrollo del turismo y el acceso ágil y directo de los productos de la zona a los mercados principales de la región, principalmente para la producción agrícola de las comunidades del área del proyecto y su posible acceso a los mercados de la ciudad de Tarija y de ciudades de otros departamentos. Es una ruta que conecta una zona de alta productividad con el eje principal de las vías

funda mentales como es la ruta F01 Tarija - La Paz, conectándose a la misma en la población de Tomatitas.

Por lo que, la Prefectura del Departamento de Tarija en la gestión 2005, a través de la Secretaría de Obras Públicas, invitó a presentar propuestas a firmas consultoras y/o consorcios legalmente establecidos en el país para realizar el "Estudio a Diseño "Cruce Cadillac-Erquis y Tomatitas-Erquis Ceibal", con una longitud de 16 km aproximadamente y con fondos provenientes de las regalías hidrocarburíferas del Departamento de Tarija.

La selección de la firma consultora y/o consorcios fue efectuada directamente por la Prefectura mediante la Comisión Calificadora quienes recomendaron en fecha 03 de agosto de 2005 la adjudicación del estudio a la empresa consultora M.T.C.B. Consultores Asociados S.R.L., mediante la Resolución Administrativa N° 0018/2005.

Luego de los trámites establecidos contractualmente en fecha 23 de mayo de 2006 fue emitida la orden de proceder iniciando los trabajos la consultora en forma inmediata. Posteriormente, habiéndose modificado los requerimientos del Viceministerio de Inversión Pública y Financiamiento Externo en cuanto a los nuevos formatos para estudios de pre inversión, y ante presiones sociales y entrega del proyecto a diseño final culminado por parte de la Secretaría de Obras Públicas para iniciar su ejecución, es que el SEDECA en función al mencionado diseño final del proyecto realizado por la empresa MTCB Consultores Asociados S.R.L., realiza la adecuación a formato TESA (estudio integral técnico, económico, social y ambiental) del proyecto, a fin de realizar su inscripción en el POA 2011, y poder ejecutar la obra baja convenio con el Municipio, por tratarse de un proyecto que forma parte de la red municipal.

- **Nombre del Proyecto:** "Construcción camino Tomatitas- Erquis Norte-Erquis Ceibal- Cr. Cadillac
- **Localización:** Este proyecto se encuentra ubicado en la Provincia Méndez.
- **Clasificación sectorial:** Infraestructura Vial.

- **Componentes del proyecto: rubros** 1. Movimiento de tierras; 2. Pavimento; 3. Estructuras; 4. Obras de drenaje; 5. Obras Complementarias; 6. Trabajos ambientales; 7. Servicios para el ingeniero.
- **Fase que postula:** Inversión. Entidad Promotora: Gobierno Autónomo del Departamento de Tarija.
- **Entidad Ejecutora:** Servicio Departamental de Caminos (bajo convenio municipal).

En las políticas y/o objetivos institucionales y regionales se ha visto necesario ejecutar el Proyecto Construcción Camino Tomatitas. Erquis norte - Erquis Ceibal -Cr. Cadillar, Código SISIN 906-00401-00000 y con Categoría Programática 52-0117-000, aprobado mediante Informe ATEP N° 009/2011 en fecha 11 de enero de 2011.

### **3.4.3 Parámetros de Diseño geométrico**

Se planteó criterios de diseño para la carretera en función de las características topográficas, ambientales y de la infraestructura existente como viviendas, muros, etc., que se encontró en la zona durante la ejecución de los estudios. Las consideraciones corresponden a criterios de tipo geométrico para la elaboración del proyecto de trazado de la vía, tales como velocidad de diseño, radio mínimo, pendiente longitudinal y longitud máxima de pendiente en zona plana y en zona ondulada, pendiente mínima en zona llana, peralte máximo, anchos de calzada y bermas pendientes transversales de calzada y bermas, etc.

#### **a. Categoría del Camino**

Tanto las Normas del SNC 1990 (S'90) como las AASHTO 1994 (A'94) se basan en dos factores, uno funcional correspondiente al Volumen de Tránsito Diario (VTD probable a los 10 años), y otro económico que está en base al análisis de factibilidad de la ruta en estudio. De acuerdo al estudio de tráfico realizado el TPDA al final de los 10 primeros años de puesta en servicio la carretera es igual a  $683 < 700$  por lo que resulta un camino de **Categoría III** según las Normas del SNC, cuyo rango está entre 300 a 700 vehículos.

### b. Velocidad Directriz

Las velocidades recomendadas por la norma S'90 para esta categoría de acuerdo a la topografía de la zona son:

**Tabla N° 18 Velocidades directrices según Normas S'90**

<b>Topografía</b>	<b>Velocidad Directriz</b>
Llana	80
Ondulada	60
Montañosa	40
Muy montañosa	20

**Fuente:** Normas S'90

Para el caso del proyecto se propuso adoptar para el diseño una velocidad de 30 Km/h, considerando que al tratarse de una zona prácticamente urbanizada y en los tramos restantes a todo lo largo del trazo existen varias construcciones que se encuentran al borde del camino por lo que no es conveniente un trazo con elevado patrón de diseño.

### c. Distancia de Visibilidad de Frenado

Según las recomendaciones de las Normas S'90:

**Tabla N° 19 Distancias mínimas de visibilidad de frenado en m.**

<b>V (Km/h)</b>	30	40	50	60	70	80
<b>Df (m)</b>	39	45	65	85	110	140

**Fuente:** Normas S'90

### d. Distancia de Visibilidad de Sobrepasso

Para el proyecto se utilizó las recomendaciones de la norma S'90 para las velocidades adoptadas.

**Tabla N° 20 Distancias mínimas de visibilidad de sobrepaso en m.**

<b>V (Km/h)</b>	30	40	50	60	70	80
<b>Df (m)</b>	180	270	350	420	490	560

**Fuente:** Normas S'90

#### **e. Peralte**

De acuerdo a la norma S'90, teniendo en cuenta la velocidad y topografía considerada en el diseño para todo el tramo, los valores recomendados y adoptados son  $e_{\max}=10\%$  como valor absoluto y  $e_{\max}=10\%$  como deseable.

#### **f. Pendiente Máxima**

Según Normas S'90, las pendientes longitudinales máximas hasta 1000 msnm para la Categoría del Camino III son:

**Tabla N° 21 Pendientes Longitudinales Máximas**

<b>Topografía</b>	<b>Deseable</b>	<b>Admisible</b>
Llana	6	7
Ondulada	7	8
Montañosa	7	8
Muy montañosa	7	8

**Fuente:** Normas S'90

#### **g. Pendiente Mínima**

Según Normas S'90 la pendiente mínima para tramos en corte será por lo menos de 0.5%, de ser posible sería deseable un valor no menor que 1%, en caso de terraplén este valor puede reducirse a 0.35%.

#### **h. Ancho de Calzada y Berma**

Normas **S'90**: para Categoría del Camino III, el ancho de carril está definido en una dimensión 3.0 metros y un ancho de berma comprendido entre el rango de 1-1.5 m para las diferentes condiciones topográficas de acuerdo a lo siguiente:



**Tabla N° 22 Ancho de calzada y berma**

<b>Tramo 1</b>		
Secciones	Ancho de calzada (m)	Ancho de Berma (m)
1	6,00	1,00
2	6,00	1,50
3	6,00	1,50
<b>Tramo 2</b>		
Secciones	Ancho de calzada (m)	Ancho de Berma (m)
4	4,00	1,00
5	4,00	1,00

**Fuente:** SEDECA

#### **i. Pendientes Transversales**

Para la carretera la pendiente transversal de los carriles será de 2.0% (pavimento flexible), y la de las bermas de 3% (tratamiento superficial simple).

#### **j. Taludes**

Para el proyecto se ha adoptado para todo el tramo un talud de Corte H: V de 1:3 y para terraplén H: V de 1.5:1 que no es lo más recomendable por condiciones de seguridad y alturas pequeñas de los mismos, sin embargo, como se mencionó anteriormente existe mucha limitación de espacio.

### **3.5 Consideraciones iniciales**

Algunos elementos, factores o variables extrañas (que no son las variables principales), que pudieran incidir en los resultados son:

#### **3.5.1 Clima**

La variación constante de la temperatura debido al clima extremo, pasar del frío al calor ocasiona una contracción y dilatación de la carpeta de rodadura ya sea este pavimento rígido o flexible, al sufrir estas deformaciones producen fallas como fisuras deterioro del agregado pétreo por el tanto deterioro de la textura superficial, al estar en malas condiciones el agua de las lluvias se empoza produciendo mayor riesgo vial debido a la

posible pérdida del control del vehículo debido al hidropneumático, sin contar que por filtración del agua podría causar daños estructurales.

Esta Variable extraña no afectara de forma significativa a los métodos utilizados, porque en la zona de estudio la variación de la temperatura no es muy extrema a comparación de otras zonas del departamento de Tarija.

### **3.5.2 Temperatura**

Tanto la temperatura del neumático como la temperatura de la superficie del pavimento ocasionan una variación en las medidas realizadas en consecuencia varía en el coeficiente de fricción, se sabe que cuando aumenta la temperatura el coeficiente de fricción disminuye.

Las medidas efectuadas sobre el pavimento están siempre afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada; es por esto, que al valor obtenido del péndulo se le adiciona un factor (Gráfico N°1 del Capítulo II) a la lectura efectiva. Por ejemplo, si obtenemos una lectura de promedio de 78 y tenemos una temperatura de 30°C, le adicionaremos a 78 el factor de 2 y tendremos 80.

### **3.5.3 Neumáticos**

Son parte del elemento estructural del vehículo, es la que nos mantiene en contacto directo con la superficie del pavimento y consigue con la adherencia entre estos que la fuerza del motor se transfiera a los neumáticos y origine el movimiento, también son los encargados de recibir todo el peso del coche incluido los pasajeros dentro de este.

Se ha demostrado experimentalmente que con presiones por debajo de los indicado por el fabricante se aumenta la distancia de frenado.

A mayor carga requiere una mayor presión de inflado que cuando se encuentra en condición sin peso, además si bien llevar los neumáticos a una presión inadecuada desgasta de manera irregular, experimentalmente se demostró que también aumenta el riesgo por hidropneumático.

### **3.6 Recolección de información**

El tramo Tomatitas-Erquis estudiado en la Provincia Méndez fue de una longitud de cinco kilómetros (5 Km) y se evaluó puntos de control de microtextura y macrotextura cada cien metros (100 m).

#### **3.6.1 Metodología para la recolección de información**

Metodología y pasos seguidos:

1. Inspección visual de todo el tramo (ida y regreso).
2. Ubicación de los puntos a auscultar donde se ejecutará los ensayos para determinar la macrotextura (mancha de arena) y la microtextura (Péndulo de fricción británico)
3. Los puntos en estudio se consideraron cada cien metros de longitud, todo el tramo se dividió en segmentos iguales.
4. Cada segmento se dividió en dos secciones, un punto de control de microtextura y macrotextura en carril de ida y otro en carril de vuelta.
5. Los tramos de ensayo se señalaron convenientemente para poder realizar las mediciones.
6. Se formaron tres grupos, uno para las pruebas de textura (círculo de arena), otro para las pruebas de fricción (péndulo británico) y el tercero para seguridad vial y señalización.
7. Las medidas de la textura se llevaron a cabo antes de realizar las mediciones de fricción, es decir antes de mojar el pavimento.
8. Trabajo de gabinete para el cálculo del c.d.r (coeficiente resistencia al deslizamiento) y la profundidad de textura (H), con estos valores poder analizar la relación entre estas dos variables.
9. Según los resultados obtenidos se analizó el nivel de relación que existe entre estas dos variables (coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura del tramo Tomatitas-Erquis).

### 3.4.2 Medición de la macrotextura por medio de la prueba del círculo de arena (ASTM E-965)

Este ensayo de campo sirve para conocer la macrotextura de la superficie del pavimento, mediante la aplicación de un volumen de material conocido se llenarán los huecos completamente y la subsecuente medición del área total cubierta por este. Para final determinar la profundidad media de la macrotextura.

Se muestra un breve resumen del procedimiento en campo siguiendo la normativa ASTM E-965.

1. Inspección del área a ensayar, esta debe ser homogénea y seca sin imperfecciones. Se procede a limpiar la superficie con una escobilla o brocha a ensayar sin dejar rastro de polvo sobre ella.

**Figura N° 15 Limpieza de la superficie del pavimento**



**Fuente:** Elaboración propia

2. Se llena la muestra completamente en el cilindro de volumen conocido, la medida del volumen se verifico en peso y volumen para mantener un estándar en todas las medidas realizadas en campo.

**Figura N° 16 Verificación del Volumen y Peso**



**Fuente:** Elaboración propia

3. Se vacía el material del cilindro dentro de la superficie limpia, se esparce todo el material en forma circular con el disco utilizando su lado de goma para estos efectos, llenando las cavidades de la superficie a ras con las crestas de los áridos de la capa de rodadura.

**Figura N° 17 Esparcido del material**



**Fuente:** Elaboración propia

4. Se mide y registra el diámetro del área cubierta por el material tomando cinco medidas igualmente espaciadas sobre el círculo.

**Figura N° 18 Medición del diámetro**



**Fuente:** Elaboración propia

5. Se toma las siguientes mediciones de campo:

**Tabla N° 23 Tabla de datos del círculo de arena**

<b>Proyecto:</b>					
<b>Tramo:</b>		<b>Carril:</b>		<b>Fecha:</b>	
<b>Volumen de la muestra</b>			<b>ml</b>	<b>=</b>	<b>mm<sup>3</sup></b>
<b>Ensayo Círculo de Arena</b>					
<b>Progr.</b>	<b>Diámetros (cm)</b>				

**Fuente:** Elaboración propia

Cabe mencionar que todas las mediciones se realizaron en el carril derecho (ida) y carril izquierdo (vuelta) en la huella derecha de la vía.

El ensayo del círculo de arena se realizó de manera paralela a los ensayos realizados del péndulo británico, es decir fueron realizados en las mismas progresivas.

Para sacar la media de los valores del círculo de arena, pueden sumarse todos y dividirlo entre el número de mediciones; o bien, eliminar el término más alto y el más bajo, y con las lecturas restantes obtener la media. Esta última operación es más recomendable para evitar que algún valor que se sale de rango afecte significativamente los resultados.

Por ejemplo, para la progresiva 0+000

**Medición 1:** 18,5 cm

**Medición 2:** 18,6 cm

**Medición 3:** 19,0 cm

**Medición 4:** 18,5 cm

**Medición 5:** 18,7 cm

$$\text{Diámetro promedio} = D_p = \frac{18,5 + 18,6 + 19,0 + 18,5 + 18,7}{5}$$

$$D_p = \mathbf{18,7 \text{ cm}}$$

Una vez calculado el diámetro promedio para cada progresiva, se procede a calcular la  $H=Tx$  (promedio del espesor de la macrotextura de la superficie en mm), usando la ecuación 2-9 del apartado 2.6.4 del Capítulo II; por ejemplo, de la Progr. 0+000 que tiene como promedio  $D_p = 18,7 \text{ cm} = 187 \text{ mm}$ , entonces:

$$H = Tx = \frac{4 * V}{\pi * d^2}$$

$$H = Tx = \frac{4 * 25\ 000}{\pi * (187)^2}$$

$$H = Tx = \mathbf{0,914 \text{ mm}}$$

la Progr. 0+000 tiene una altura de macrotextura de 0,914 mm.

De igual forma, usando el mismo procedimiento se calculó la macrotextura para el carril izquierdo (vuelta) del tramo Tomatitas-Erquis, tomando en cuenta los mismos criterios que recomienda el modelo PIARC.

A continuación, se muestran los resultados de la medición de macrotextura para ambos carriles y el promedio por progresiva:

**Tabla N° 24 Macrotextura por progresiva**

<b>Progresiva</b>	<b>Macrotextura Carril derecho (mm)</b>	<b>Macrotextura Carril Izquierdo (mm)</b>	<b>Promedio MTD (mm)</b>
0+000	0,91	0,86	0,89
0+100	0,77	0,93	0,85
0+200	0,85	1,04	0,94
0+300	0,69	0,76	0,73
0+400	0,84	1,05	0,94
0+700	0,64	0,63	0,64
0+800	0,62	0,62	0,62
0+900	0,49	0,66	0,58
1+000	0,62	0,53	0,57
1+100	0,68	0,54	0,61
1+200	0,58	0,54	0,56
1+300	0,52	0,60	0,56
1+400	0,66	0,51	0,59
1+500	0,56	0,48	0,52
1+600	0,42	0,57	0,50
1+700	0,39	0,76	0,57
1+800	0,54	0,68	0,61
1+900	0,45	0,55	0,50
2+000	0,60	0,60	0,60
2+100	0,48	0,50	0,49
2+200	0,50	0,51	0,51
2+300	0,54	0,63	0,59
2+400	0,43	0,50	0,46
2+500	0,42	0,56	0,49
2+600	0,62	0,41	0,52
2+700	0,54	0,61	0,57
2+800	0,60	0,51	0,55
2+900	0,52	0,60	0,56
3+000	0,66	0,49	0,57
3+100	0,49	0,45	0,47



3+200	0,57	0,51	0,54
3+300	0,68	0,71	0,69
3+400	0,56	0,61	0,59
3+500	0,66	0,57	0,61
3+600	0,53	0,63	0,58
3+700	0,56	0,69	0,63
3+800	0,63	0,65	0,64
3+900	0,51	0,56	0,53
4+000	0,47	0,68	0,57
4+100	0,41	0,57	0,49
4+200	0,36	0,48	0,42
4+300	0,43	0,54	0,49
4+400	0,48	0,50	0,49
4+500	0,49	0,67	0,58
4+600	0,51	0,62	0,56
4+700	0,43	0,57	0,50
4+800	0,50	0,65	0,58
4+900	0,49	0,64	0,56
5+000	0,57	0,51	0,54

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4.3 Medición de la fricción por medio del péndulo británico- TRRL (ASTM E-274)

Este ensayo tiene como finalidad obtener el Coeficiente resistencia al deslizamiento C.D.R, este equipo mide la energía perdida cuando el patín de caucho desliza sobre la superficie. Se muestra un breve resumen del procedimiento siguiendo la normatividad:

1. Selección del lugar a examinar para luego proceder a posicionar el equipo en forma longitudinal al camino, se nivela el equipo y se coloca el brazo del péndulo.

**Figura N° 19 Armado del equipo**



**Fuente:** Elaboración propia

2. Se deja limpia libre de partículas sueltas y polvo por donde pasara el patín, se procede con la elevación de la cabeza del equipo para comprobar el cero sin que el patín se deslice sobre la superficie esto con la ayuda de los tornillos se ajustara o aflojara como sea necesario, ya comprobado el cero del equipo, se nivela la altura de la cabeza del péndulo con la finalidad de tener un área de contacto con las especificaciones adecuadas de la distancia de deslizamiento.

**Figura N° 20 Verificación del área de contacto**



**Fuente:** Elaboración propia

3. Realizado todos estos pasos, se coloca el brazo en la posición de disparo, se moja el patín de caucho como también la superficie a ensayar con abundante agua. Luego se obtura el botón y se suelta el brazo libremente. En caso de que sea la primera medición del día se debe calentar previamente la zapata realizando el ensayo como mínimo cinco veces y sin mojar la superficie, antes de la realización de las mediciones.

**Figura N° 21 Mojado de la superficie**



**Fuente:** Elaboración propia

4. La aguja registrara el valor obtenido para ser registrado, se registra la temperatura en cada medición para la posible corrección. Se realiza cinco mediciones en cada punto.

**Figura N° 22 Registro de la temperatura**



**Fuente:** Elaboración propia

5. Se toma las siguientes mediciones en campo:

**Tabla N° 25 Tabla de datos del péndulo británico TRRL**

<b>Proyecto:</b>						
<b>Tramo:</b>		<b>Carril:</b>		<b>Fecha:</b>		
<b>Ensayo Péndulo de fricción</b>						
Progresiva	Temp (°C)	Lecturas				
		1	2	3	4	5

**Fuente:** Elaboración propia

Cabe mencionar que todas las mediciones se realizaron en el carril derecho (ida) y carril izquierdo (vuelta) en la huella derecha de la vía.

El ensayo del péndulo británico se realizó de manera paralela a los ensayos realizados del péndulo británico, es decir fueron realizados en las mismas progresivas.

A continuación, se muestran los cálculos del coeficiente de resistencia al deslizamiento, como así también el cálculo de los diferentes factores que nos ayudó a calcular la microtextura del tramo estudiado:

Para sacar el promedio de las lecturas del péndulo británico, pueden sumarse todos y dividirlo entre el número de lecturas; o bien, eliminar el término más alto y el más bajo, y con las lecturas restantes obtener la media. Esta última operación es más recomendable para evitar que algún valor que se sale de rango afecte significativamente los resultados.

Por ejemplo, para la progresiva 0+000

**Lectura 1:** 90 adim.

**Lectura 2:** 88 adim.

**Lectura 3:** 92 adim.

**Lectura 4:** 93 adim.

**Lectura 5:** 91 adim.

$$Lectura\ efectiva = BPN = \frac{90 + 88 + 92 + 93 + 91}{5}$$

$$Lectura\ efectiva = BPN = \mathbf{90,80\ adim.}$$

Las medidas efectuadas sobre el pavimento están siempre afectadas por las variaciones de temperatura de la zapata y de la superficie ensayada (Variable extraña); es por esto, que al valor obtenido del péndulo se le adiciona un factor a la lectura efectiva ( $F_{C20^\circ}$ ), este factor se calculó usando la Ecuación de la Gráfica N°2 Formula para calcular  $F_{C20^\circ}$ .

Por ejemplo, para la progresiva 0+000, la temperatura de la superficie a la hora de la medición del BPN fue de **26 °C**, con este dato se puede calcular el factor de temperatura; donde x = temperatura medida, entonces:

**Factor de temperatura ( $F_{c_{20^\circ}}$ )**

$$F_{c_{20^\circ}} = y = -0,005 * x^2 + 0,45 * x - 7$$

$$F_{c_{20^\circ}} = y = -0,005 * 26^2 + 0,45 * 26 - 7$$

$$F_{c_{20^\circ}} = \mathbf{1,32}$$

Entonces a la lectura efectiva (BPN) en esa progresiva, se le adicionara un factor de temperatura igual a 1,32.

Finalmente, para obtener el coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r) se divide entre 100, entonces:

**Coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r)**

$$c. d. r = \frac{\text{Lectura Efectiva} + F_{c_{20^\circ}}}{100}$$

- Datos para la progresiva 0+000

**Lectura efectiva BPN promedio = 90,80**

**$F_{c_{20^\circ}} = 1,32$**

$$c. d. r = \frac{90,80 + 1,32}{100}$$

$$c. d. r = \mathbf{0,92}$$

Calculado el coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r), usando la *Tabla N°11 Valores de fricción con Péndulo Británico*, se puede tener un criterio en la calificación de este.

Los cálculos realizados evidencian un valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento igual a 0,92 por lo que la microtextura (fricción) se califica en malo, existiendo un desgaste de los neumáticos.

A continuación, se muestra los resultados de c.d.r para todas las progresivas del tramo estudiado:

**Tabla N° 26 Coeficiente de resistencia al deslizamiento por progresiva**

<b>Progresiva</b>	<b>c.d.r Carril derecho (adim.)</b>	<b>c.d.r Carril Izquierdo (adim.)</b>	<b>c.d.r Promedio (adim.)</b>
0+000	0,92	0,84	0,88
0+100	0,78	0,77	0,78
0+200	0,76	0,68	0,72
0+300	0,79	0,63	0,71
0+400	0,80	0,71	0,75
0+700	0,76	0,68	0,72
0+800	0,82	0,69	0,76
0+900	1,08	0,72	0,90
1+000	0,92	0,72	0,82
1+100	0,57	0,74	0,66
1+200	0,57	0,75	0,66
1+300	0,59	0,76	0,68
1+400	0,58	0,78	0,68
1+500	0,61	0,80	0,70
1+600	0,60	0,83	0,71
1+700	0,61	0,86	0,73
1+800	0,54	0,88	0,71
1+900	0,56	0,86	0,71
2+000	0,69	0,82	0,76
2+100	0,58	0,78	0,68
2+200	0,48	0,77	0,62
2+300	0,40	0,79	0,59
2+400	0,39	0,79	0,59
2+500	0,58	0,79	0,69
2+600	0,67	0,78	0,73
2+700	0,67	0,79	0,73
2+800	0,68	0,85	0,76
2+900	0,69	0,84	0,76
3+000	0,65	0,93	0,79
3+100	0,65	0,87	0,76
3+200	0,67	0,85	0,76
3+300	0,64	0,80	0,72
3+400	0,63	0,81	0,72

3+500	0,59	0,79	0,69
3+600	0,58	0,75	0,66
3+700	0,59	0,76	0,67
3+800	0,65	0,90	0,78
3+900	0,66	0,87	0,76
4+000	0,67	0,85	0,76
4+100	0,60	0,81	0,70
4+200	0,57	0,79	0,68
4+300	0,66	0,79	0,72
4+400	0,71	0,76	0,73
4+500	0,68	0,79	0,74
4+600	0,69	0,78	0,73
4+700	0,72	0,80	0,76
4+800	0,72	0,84	0,78
4+900	0,68	0,86	0,77
5+000	0,62	0,87	0,75

**Fuente:** Elaboración propia



## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### **4.1 Análisis de la relación entre coeficiente de resistencia al deslizamiento y macrotextura**

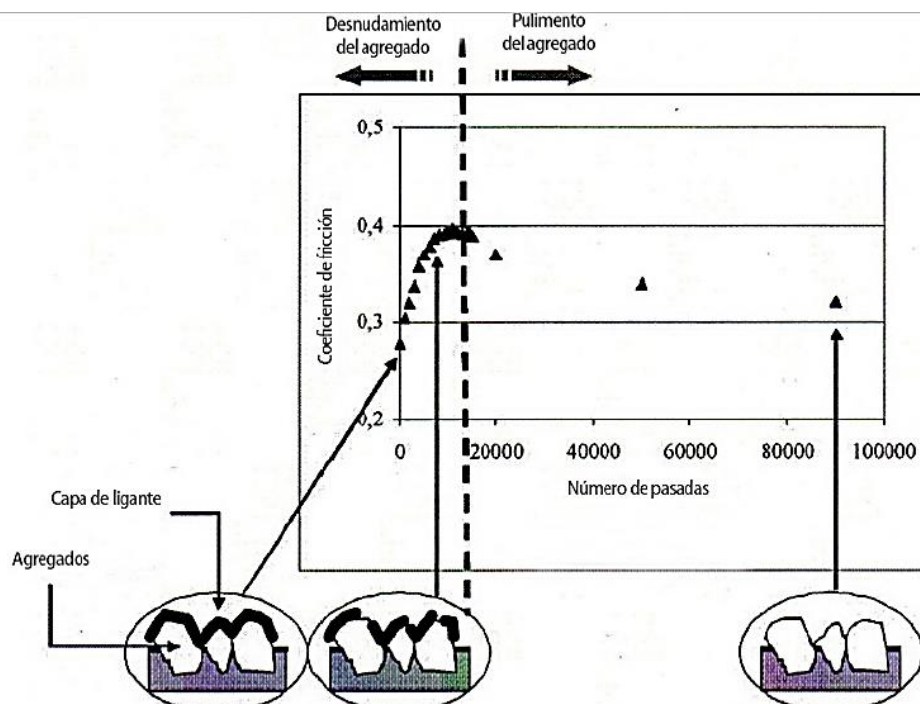
##### **4.1.1 Relación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura**

Se analizó la relación de estas variables y se concluyó que no existe una relación directa entre las variables estudiadas, no obstante, existe una forma de explicar una relación indirecta entre ellas mediante el tipo de textura presente en el pavimento dada por la macrotextura medida.

Estudios realizados por el Laboratorio Francés de Puentes y Carreteras son un buen punto de partida para entender la evolución de la fricción superficial en pavimentos asfálticos. Este laboratorio desarrolló una hipótesis para evaluar el proceso de pulimento del agregado.

Como resultado de la investigación llevada a cabo por el LCPC, se evidenciaron dos etapas en la evolución de la fricción superficial de un pavimento asfáltico. Se observó, en primera instancia, un incremento en la fricción superficial hasta llegar a un punto máximo donde el agregado empieza a pulirse pues ya no tiene una cobertura de asfalto que lo proteja, la macrotextura en este punto pasa de tener valores menores a mayores como resultado de la pérdida de cobertura de asfalto, aumentando el número de vacíos en la superficie del pavimento, dejando expuesto al agregado y por esta razón comienza a pulirse; consecuentemente, la fricción superficial decae. Tal comportamiento se ilustra en la siguiente figura.

**Figura N° 23 Coeficiente de fricción contra el número de pasadas**



**Fuente:** Evolución de la fricción superficial en pavimentos asfálticos, 2019

De acuerdo con lo mencionado hasta el momento, para un pavimento nuevo se podría esperar que su coeficiente de fricción incremente conforme el ligante superficial se remueve por efecto del tránsito vehicular, hasta llegar a un punto donde la fricción superficial dependa solamente de las propiedades del agregado constituyente.

Posteriormente a la etapa de desnudamiento del agregado, inicia la etapa de pulimento del agregado, donde el coeficiente de fricción superficial disminuye hasta lograr estabilizarse. Dicho equilibrio se alcanza aproximadamente luego de que la carretera ha soportado 1 millón de ejes equivalentes de carga (Kokkalis, 1998), de modo que en este punto las variaciones en el coeficiente de fricción son mínimas, siempre y cuando no existan deterioros importantes en la carretera.

La resistencia al deslizamiento del pavimento está directamente relacionada con el número de accidentes viales, principalmente en condiciones de superficie húmeda. Por esta razón es importante para las agencias de tránsito la evaluación y monitoreo de la fricción o la textura. Las metodologías actuales de evaluación de fricción en el pavimento presentan

una serie de desventajas, por lo que resultan imprácticas para estudios de campo en redes viales de gran tamaño. Por lo tanto, es importante valorar distintos métodos de estimación de la fricción basados en otras propiedades más prácticas y sencillas de evaluar. La resistencia al deslizamiento está afectada principalmente por la textura de la superficie del pavimento, sin embargo, no se posee un método de cuantificación de este efecto en las propiedades finales de la resistencia al deslizamiento.

La fricción es la fuerza que resiste el movimiento relativo entre el neumático del vehículo y la superficie del pavimento. La resistencia al deslizamiento es la habilidad de la superficie del pavimento de prevenir la pérdida de tracción con el neumático, comúnmente es estimada como el coeficiente de fricción multiplicado por 100 y se le conoce como el número de deslizamiento o skid number (SN). Muchos de equipos de medición de fricción se desarrollaron con base en la medición de la fuerza generada por un material, generalmente caucho, deslizado sobre la superficie.

Debido a la eliminación de la película bituminosa que recubre los áridos, la máxima resistencia al deslizamiento se consigue después de la apertura de la vía al tráfico. Inmediatamente después de este pico, se produce la fase de pulimento dividida en dos etapas. Primero se produce una rápida pérdida de resistencia al deslizamiento debido a una alta tasa de pulimento del árido y, más tarde, esta tasa se reduce hasta que el pavimento alcanza un punto de equilibrio.

#### **4.1.2 Rangos de macrotextura**

Se realizaron las correlaciones mediante el programa STATGRAPHICS centurión tomando todos los datos medidos en campo de las dos variables estudiadas, tanto en carril derecho y carril izquierdo del tramo, promediando la MTD y el c.d.r de cada progresiva.

Se procedió a ordenar los valores de la macrotextura (variable independiente), esto para realizar con el programa un rango de este valor y así poder realizar las correlaciones de acuerdo al valor de esta variable y poder determinar una relación que sea aceptable para el estudio, la macrotextura se ordenó de mayor a menor.

Para lograr el propósito de conseguir una buena correlación  $r > 50\%$  se eliminaron un par de datos según el caso más conveniente. El suprimir estos valores se debe a que estos

puntos generan un valor de residuos cuadrados elevado respecto a la línea de tendencia ocasionando una baja correlación.

Mediante el programa STATGRAPHICS centurión, se realizaron 27 diferentes modelos de calibración de correlaciones, gracias a que este programa nos permite visualizar los resultados de los diferentes modelos de calibración se escogió el modelo con el valor más alto en su coeficiente de correlación, dando la relación más alta para los tres rangos de macrotextura un modelo no lineal denominado doble cuadrático.

El procedimiento Modelos de Calibración está diseñado para construir un modelo estadístico que describe la relación entre 2 variables, X y, donde es construir una ecuación que puede ser usada para predecir Y dada X. En una aplicación típica, Y representa el valor verdadero de alguna cantidad importante, mientras que X es el valor medido. Inicialmente, un conjunto de muestras con valores conocidos X son usadas para calibrar el modelo.

Se califican las mismas según su coeficiente de correlación r siendo:

$r = \pm 0,00$ ; Ausencia de correlación

$r = \pm 0,10$  a  $\pm 0,19$ ; Correlación insignificante

$r = \pm 0,20$  a  $\pm 0,39$ ; Correlación baja-leve

$r = \pm 0,40$  a  $\pm 0,69$ ; Correlación moderada

$r = \pm 0,70$  a  $\pm 0,99$ ; Correlación alta a muy alta

$r = \pm 1,00$ ; Función perfecta

**Fuente:** Estadística, Dr. Mayhuasca

A continuación, se muestra los resultados del programa STATGRAPHICS centurión; el procedimiento de los cálculos del programa se muestra en la parte de anexos.

Tabla N° 27 Rangos de Macrotextura

Rango	N°	Valores medidos ordenados	
		MTD (mm)	c.d.r (adim.)
0,59 a 0,90	1	0,944	0,718
	2	0,943	0,754
	3	0,888	0,880
	4	0,849	0,775
	5	0,725	0,708
	6	0,693	0,722
	7	0,640	0,777
	8	0,635	0,721
	9	0,625	0,672
	10	0,623	0,757
	11	0,613	0,692
	12	0,612	0,657
	13	0,606	0,710
	14	0,599	0,755
0,57 a 0,59	15	0,586	0,594
	16	0,585	0,719
	17	0,583	0,662
	18	0,580	0,848
	19	0,577	0,780
	20	0,576	0,897
	21	0,574	0,815
	22	0,574	0,790
	23	0,573	0,735
	24	0,573	0,759
	25	0,573	0,761
	26	0,572	0,729
	27	0,570	0,701
0,41 a 0,57	28	0,563	0,769
	29	0,562	0,734
	30	0,561	0,663
	31	0,559	0,764
	32	0,556	0,676
	33	0,554	0,761
	34	0,544	0,745
	35	0,539	0,756
	36	0,534	0,762
	37	0,523	0,704
	38	0,516	0,727
	39	0,506	0,622
	40	0,499	0,711
	41	0,495	0,713
	42	0,495	0,757
	43	0,492	0,704
	44	0,490	0,687
45	0,490	0,679	
46	0,489	0,732	
47	0,485	0,723	
48	0,464	0,646	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2.1 Rango de Macrotextura 0,46 a 0,57 mm

##### Regresión Simple – c.d.r (adim) vs. MTD (mm)

Variable dependiente: c.d.r (adim)

Variable independiente: MTD (mm) (Rango de 0,46 a 0,57)

Doble Inverso:  $Y = 1/(a + b/X)$

**Tabla N° 28 Coeficientes rango 0,46 a 0,57**

	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Estándar</b>	<b>Estadístico</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error</b>	<b>T</b>	<b>Valor-P</b>
Intercepto	0,381	0,159	2,395	0,031
Pendiente	0,515	0,081	6,312	0,000

**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Coefficiente de Correlación = 0,860

R-cuadrada = 73,998 por ciento

Error estándar del est. = 0,0330

Valor-P del modelo = 0,0000

Error absoluto medio = 0,0221922 La salida muestra los resultados de ajustar un modelo doble cuadrado para describir la relación entre c.d.r (adim) y MTD (mm). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{c.d.r (adim)} = 1/(0,381 + 0,515/\text{MTD (mm)})$$

- **c.d.r** = Coeficiente de resistencia al deslizamiento
- **MTD** = Macrotextura

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre c.d.r (adim) y MTD (mm) con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 73,998% de la variabilidad en c.d.r (adim)<sup>3</sup>. El coeficiente de correlación es igual a 0,860, indicando

una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0330. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones.

#### 4.1.2.2 Rango de Macrotextura 0,57 a 0,59 mm

##### Regresión Simple – c.d.r (adim) vs. MTD (mm)

Variable dependiente: c.d.r (adim)

Variable independiente: MTD (mm) (Rango de 0,57 a 0,59)

Doble Inverso:  $Y = 1/(a + b/X)$

**Tabla N° 29 Coeficientes rango 0,57 a 0,59**

	<b>Mínimos Cuadrados</b>	<b>Estándar</b>	<b>Estadístico</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error</b>	<b>T</b>	<b>Valor-P</b>
Intercepto	-11,60	2,945	-3,938	0,0056
Pendiente	7,407	1,690	4,382	0,0032

**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Coefficiente de Correlación = 0,856

R-cuadrada = 73,283 por ciento

Error estándar del est. = 0,0421

Error absoluto medio = 0,031

Valor-P del modelo = 0,0032

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo doble cuadrado para describir la relación entre c.d.r (adim) y MTD (mm). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{c.d.r (adim)} = 1/(-11,60 + 7,407/MTD (mm))$$

- **c.d.r** = Coeficiente de resistencia al deslizamiento
- **MTD** = Macrotextura

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre c.d.r (adim) y MTD (mm) con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 60,876% de la variabilidad en c.d.r (adim)<sup>2</sup>. El coeficiente de correlación es igual a 0,780, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0609. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones.

#### 4.1.2.3 Rango de Macrotextura 0,59 a 0,90 mm

##### Regresión Simple – c.d.r (adim) vs. MTD (mm)

Variable dependiente: c.d.r (adim)

Variable independiente: MTD (mm) (Rango de 0,59 a 0,90)

Doble Inverso:  $Y = 1/(a + b/X)$

**Tabla N° 30 Coeficientes rango 0,59 a 0,90**

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	0,719	0,182	3,942	0,0043
Pendiente	0,446	0,122	3,650	0,0065

**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Coeficiente de Correlación = 0,790

R-cuadrada = 62,476 porciento

Error estándar del est. = 0,0715

Error absoluto medio = 0,0558

Valor-P del modelo = 0,0065

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo doble cuadrado para describir la relación entre c.d.r (adim) y MTD (mm). La ecuación del modelo ajustado es:

$$\mathbf{c.d.r (adim)} = 1/(0,719 + 0,446/MTD (mm))$$



- **c.d.r** = Coeficiente de resistencia al deslizamiento
- **MTD** = Macrotextura

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre c.d.r (adim) y MTD (mm) con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 62,476% de la variabilidad en c.d.r (adim). El coeficiente de correlación es igual a 0,790, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,071476. Este valor puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones.

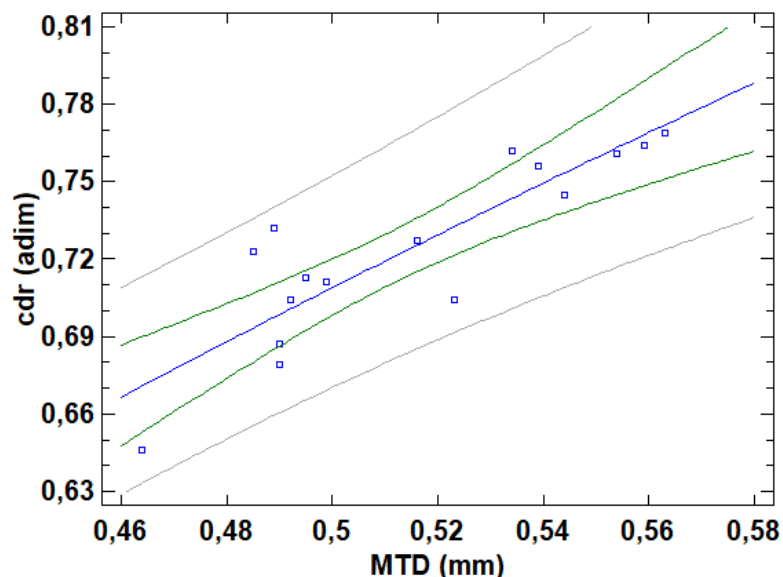
#### **4.1.2.4 Gráficos del modelo ajustado para cada rango**

La gráfica con la línea ajustada muestra la respuesta y los datos de los predictores. La gráfica incluye la línea de regresión, que representa la ecuación de regresión, también muestra los intervalos de confianza y de predicción de 95% en la gráfica.

La gráfica muestra:

- La línea del mejor ajuste o ecuación de predicción: Esta es la ecuación que debería ser usada para predecir valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r) dados los valores de la variable independiente Macrotextura (MTD).
- Intervalos de Confianza, para la respuesta media de Macrotextura. Se refiere a las bandas internas de la gráfica mostrada arriba. Los intervalos internos describen que tan adecuadamente ha sido estimada la ubicación de la línea dada la muestra de datos disponible.
- Límites de predicción para nuevas observaciones. Éstas son las bandas externas de la gráfica y describen que tan exacta sería una predicción de un nuevo valor. Sin importar el tamaño de la muestra, las observaciones nuevas variarán alrededor de la línea verdadera con una desviación estándar igual a el error estándar de est.

**Gráfico N° 3 Gráfico del modelo ajustado rango 0,46 a 0,57 mm**



**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Analizando el gráfico anterior, para el Rango de Macrotextura de 0,46 mm a 0,57 mm se desarrolló un modelo de regresión simple con una ecuación denominada Doble Inverso para predecir el coeficiente de resistencia al deslizamiento a partir de la Macrotextura en el tramo Tomatitas-Erquis. Se verificó que el modelo cumple con los supuestos del análisis (coeficiente de determinación, Valor-P, etc.).

La ecuación de regresión predice que el c.d.r. (adim) del pavimento para una nueva observación con una Macrotextura de 0,50 es:

$$\mathbf{c.d.r} = 1/(0,381 + 0,515/0,50)$$

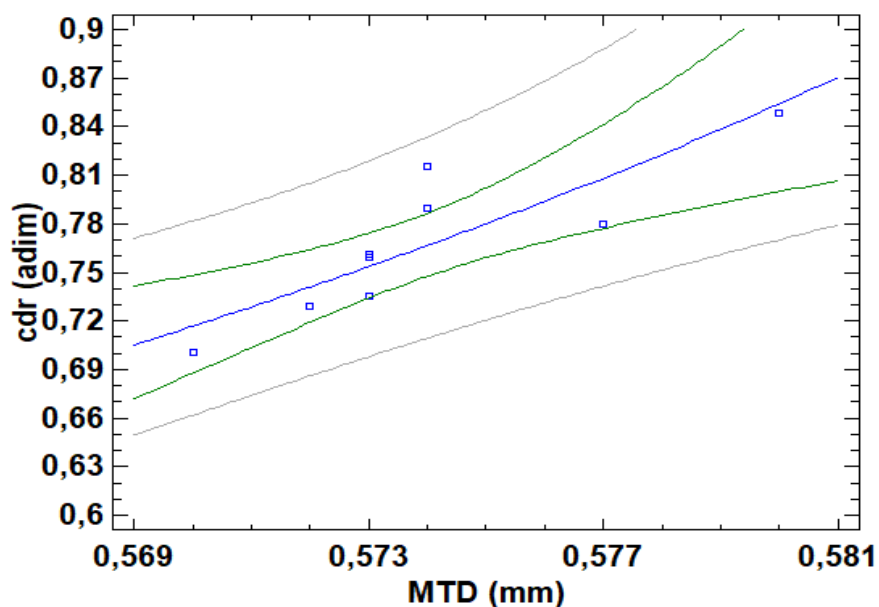
$$\mathbf{c.d.r} = 0,709 \text{ adim}$$

Aunque es poco probable que dicha medición tenga exactamente un coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r.) de 0,709, el intervalo de predicción indica que se puede estar 95% seguro de que el valor real estará aproximadamente entre 0,67 y 0,75.

El intervalo de predicción siempre es más amplio que el intervalo de confianza correspondiente. En este caso, el intervalo de confianza de 95% indica que se puede estar

95% seguro de que el valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento media estará entre aproximadamente 0,628 y 0,72.

**Gráfico N° 4 Gráfico del modelo ajustado rango 0,57 a 0,59 mm**



**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Para el Rango de Macrotextura comprendido de 0,57 mm a 0,59 mm se desarrolló un modelo de regresión simple del tipo Doble Inverso para predecir el coeficiente de resistencia al deslizamiento a partir de la Macrotextura. Se verificó que el modelo cumple con los supuestos del análisis (coeficiente de determinación, Valor-P, coeficiente de determinación, etc.).

La ecuación de regresión predice que el c.d.r (adim) del pavimento para una nueva observación con una Macrotextura de 0,573 es:

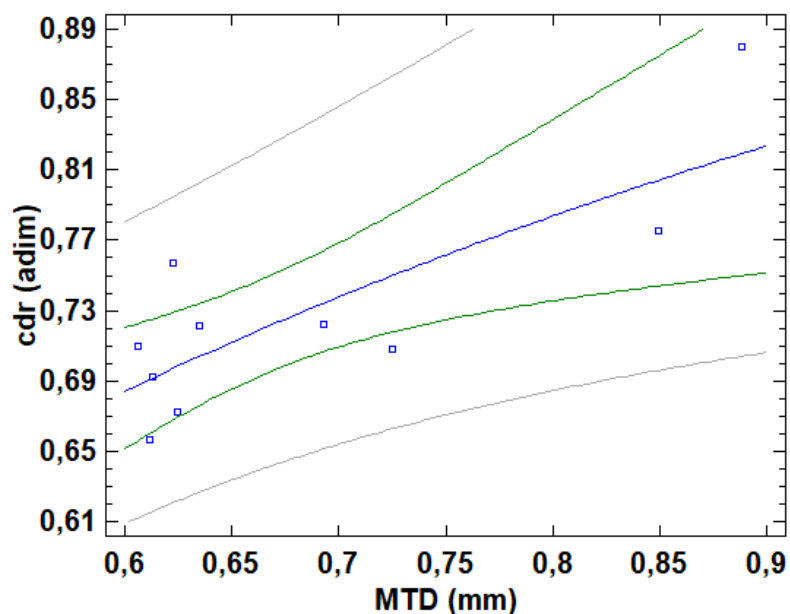
$$\mathbf{c.d.r} = 1/(-11,60 + 7,407/0,573)$$

$$\mathbf{c.d.r} = 0,754 \text{ adim}$$

Aunque es poco probable que dicha medición tenga exactamente un coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r) de 0,754, el intervalo de predicción indica que se puede estar 95% seguro de que el valor real estará aproximadamente entre 0,69 y 0,81.

El intervalo de predicción siempre es más amplio que el intervalo de confianza correspondiente. En este caso, el intervalo de confianza de 95% indica que se puede estar 95% seguro de que el valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento media estará entre aproximadamente 0,73 y 0,76.

**Gráfico N° 5 Gráfico del modelo ajustado rango 0,59 a 0,90 mm**



**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Para el último Rango de Macrotextura comprendido de 0,59 mm a 0,90 mm se desarrolló un modelo de regresión simple del tipo Doble Inverso para predecir el coeficiente de resistencia al deslizamiento a partir de la Macrotextura. Se verificó que el modelo cumple con los supuestos del análisis.

La ecuación de regresión predice que el c.d.r (adim) del pavimento para una nueva observación con una Macrotextura de 0,70 es:

$$\mathbf{c.d.r} = 1/(0,719 + 0,446/0,70)$$

$$\mathbf{c.d.r} = 0,737 \text{ adim}$$

Es poco probable que dicha medición tenga exactamente un coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r) de 0,737, el intervalo de predicción indica que se puede estar 95% seguro de que el valor real estará aproximadamente entre 0,65 y 0,84.

El intervalo de predicción siempre es más amplio que el intervalo de confianza correspondiente. En este caso, el intervalo de confianza de 95% indica que se puede estar 95% seguro de que el valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento media estará entre aproximadamente 0,70 y 0,76.

#### 4.2 Interpretación del coeficiente de correlación (r)

Al interpretar y comentar los coeficientes de correlación conviene buscar cierta estructura, se da dicha correlación, si los valores de una de esas variables varían de manera sistemática respecto a los valores similares de la otra variable; por ejemplo, entre dos variables (A y B) se da correlación si los valores de la variable A aumentan y también suben los valores de B y si se da viceversa.

El propósito de la correlación es poder estimar una variable dependiente (c.d.r) en función de una variable independiente (MTD).

Los dos parámetros estadísticos más importantes que se emplearán para evaluar las correlaciones en esta investigación son el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ).

**Tabla N° 31 Coeficiente de correlación**

N°	Tipo de correlación	Rango de macrotextura	Coefficiente de correlación (r)	Nivel de relación
1	Cuadrado Doble	0,59 a 0,90	0,838	Alta a muy alta
2	Cuadrado Doble	0,57 a 0,59	-0,837	Alta a muy alta
3	Cuadrado Doble	0,42 a 0,57	0,841	Alta a muy alta

**Fuente:** Elaboración propia

El comportamiento de estas variables demostró una correlación lineal Doble Inverso. Se trabajó con rangos de macrotextura (MTD) para lograr una correlación  $>70\%$ . Se observa que, el uso de estas gráficas se limita a valores de MTD establecidas de acuerdo con los

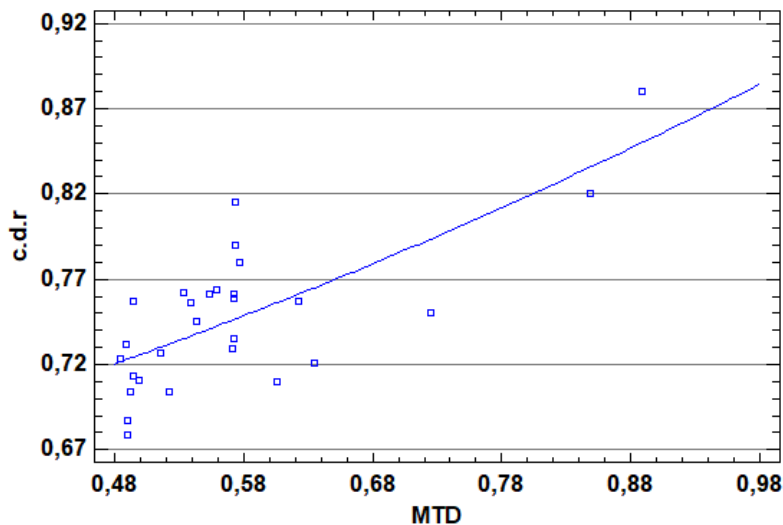
datos obtenidos. También existe una relación directamente proporcional positiva entre el c.d.r (adimensional) y la MTD (mm) ya que mientras la MTD aumenta el c.d.r va creciendo.

Como resultado de la investigación llevada a cabo, se observó, en primera instancia, un incremento en el coeficiente de fricción superficial donde el agregado empieza a pulirse pues ya no tiene una cobertura de asfalto que lo proteja, consecuentemente, la fricción superficial decaerá.

De acuerdo con lo mencionado hasta el momento, para un pavimento nuevo se podría esperar que su coeficiente de fricción incremente conforme el ligante superficial se remueve por efecto del tránsito vehicular, hasta llegar a un punto donde la fricción superficial dependa solamente de las propiedades del agregado constituyente.

Debido a la eliminación de la película bituminosa que recubre los áridos, la máxima resistencia al deslizamiento se consigue después de la apertura de la vía al tráfico. Inmediatamente después de este pico, se produce la fase de pulimento dividida en dos etapas. Primero se produce una rápida pérdida de resistencia al deslizamiento debido a una alta tasa de pulimento del árido y, más tarde, esta tasa se reduce hasta que el pavimento alcanza un punto de equilibrio.

**Gráfico N° 6 Tendencia del coeficiente de resistencia al deslizamiento respecto a la macrotextura en la carretera Tomatitas-Erquis**



**Fuente:** STATGRAPHICS centurión

Actualmente el tramo se encuentra en buenas condiciones, esto debido a los resultados de macrotextura y microtextura realizados; Los valores generales del coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r), reflejan que de los cinco kilómetros analizados tanto para carril derecho como para carril izquierdo tienen un promedio de 0,73 adim. con una clasificación de **Bueno**, y la macrotextura con un valor promedio de 0,59 mm clasificándose en una macrotextura **Media**.

La macrotextura es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidad media y elevadas con pavimento mojado debido a que evita la incidencia de los accidentes por Hidroplaneo; ya que, al contar con una buena textura, nos permitirá drenar el agua superficial con mayor facilidad eliminar dicho efecto y por consiguiente nos permitirá también una mejor visibilidad de las marcas viales y una evacuación inmediata del agua superficial que redundará en una mejora en la seguridad de operación. Un buen coeficiente de resistencia al deslizamiento es necesario pues es el que brinda la resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas y secas, una buena superficie de rodadura debe ofrecer una buena adherencia entre el neumático y el pavimento mediante una microtextura áspera del agregado.

A partir de estos resultados de c.d.r y Macrotextura, se puede observar la tendencia señalada previamente donde el coeficiente de resistencia al deslizamiento tiende a incrementar cuando la altura de macrotextura aumenta, esto debido a que aun la carretera se encuentra en la etapa de desnudamiento del agregado, esto reflejado en la clasificación de la macrotextura; de no ser así, se observaría una tendencia negativa del c.d.r y la clasificación de la macrotextura sería gruesa debido al aumento de vacíos que provocaría la pérdida de cobertura de asfalto exponiendo al agregado a un mayor grado de pulimiento reduciendo los valores del coeficiente de resistencia al deslizamiento.

Posteriormente a la etapa de desnudamiento del agregado, inicia la etapa de pulimento del agregado, donde el coeficiente de fricción superficial disminuirá hasta lograr estabilizarse. Dicho equilibrio se alcanza aproximadamente luego de que la carretera ha soportado 1 millón de ejes equivalentes de carga (Kokkalis, 1998), de modo que en este punto las variaciones en el coeficiente de fricción son mínimas, siempre y cuando no existan deterioros importantes en la carretera.

El comportamiento del coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura demostró una **correlación Alta a muy alta**, lo que significa que la relación entre ambas variables es significativamente buena.

En general, podría decirse que la relación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura es alta por las siguientes razones:

- Los diagramas de dispersión están muy cercanos de la línea de tendencia.
- Las correlaciones son aproximadamente de 0,80 (correlación alta a muy alta).

#### 4.3 Interpretación del coeficiente de determinación ( $r^2$ )

Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

Realizando los cálculos mediante el programa STATGRAPHICS centurión, para cada uno de los rangos de Macrotextura obtenemos sus ecuaciones y el valor para el coeficiente de determinación:

**Tabla N° 32 Coeficiente de determinación**

N°	Tipo de correlación	Rango de macrotextura	Ecuación	$r^2$
1	Doble inverso	0,59 a 0,90	$c. d. r = \frac{1}{(0,719 + \frac{0,446}{MTD})}$	62,48%
2	Doble inverso	0,57 a 0,59	$c. d. r = \frac{1}{(-11,60 + \frac{7,407}{MTD})}$	73,283%
3	Doble inverso	0,46 a 0,57	$c. d. r = \frac{1}{(0,381 + \frac{0,515}{MTD})}$	73,998%

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla anterior se muestra que la correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura del tramo Tomatitas-Erquis es **Aceptable** según la tabla de criterio de bondad de ajuste de parámetros estadísticos (*Pellinen, 2001*). esto debido a



que el  $r^2$  son mayores a 60%. es aceptable, se observa una tendencia lineal clara con un modelo denominado Doble Inverso.

A la vista del resultado analítico podemos afirmar que el ajuste de los modelos es óptimo, ya que el valor de  $r^2$  es cercano a 1, en concreto, el 60% de la variabilidad de la variable  $Y$  a su promedio es explicado por el modelo de regresión ajustado.

Este coeficiente de determinación multiplicado por 100 y redondeado, es la certeza con que se afirma que en un 60% los valores de  $y$  dependen de los valores de  $x$ .

#### 4.4 Estadística descriptiva

Se realizó la estadística descriptiva mediante el programa IBM SPSS Statistics Visor, los datos usados se muestran en la Tabla N° 24 *Rangos de Macrotectura*, se muestra los resultados en forma de tabla de todas mediciones de media, moda, etc.

Las variables se describen como:

- Variable independiente = MTD (macrotectura)
- Variable dependiente= CDR (coeficiente de resistencia al deslizamiento)

**Tabla N° 33 Frecuencias de las variables**

<b>Estadísticos</b>			
		<b>MTD</b>	<b>c.d.r</b>
<b>N</b>	<b>Válido</b>	98	98
	<b>Perdidos</b>	0	0
<b>Media</b>		0,586	0,727
<b>Error estándar de la media</b>		0,013	0,011
<b>Mediana</b>		0,565	0,750
<b>Moda</b>		0,51	0,79
<b>Desv. Desviación</b>		0,128	0,117
<b>Varianza</b>		0,017	0,014
<b>Mínimo</b>		0,36	0,39
<b>Máximo</b>		1,05	1,08

**Fuente:** Elaboración propia, IBM SPSS Statistics Visor

**Interpretación Descriptiva:** el valor que más se repitió fue 0,51 para MTD y 0,79 para el c.d.r. Cincuenta por ciento de los valores está por encima de 0,565 para MTD y 0,750 para el c.d.r. Lo anterior va de acuerdo con que, en promedio, los valores medidos, se ubican en 0,586 (Media) para el MTD y 0,727 (Bueno) para el c.d.r, desviados en promedio de esos datos 0,128 y 0,117 unidades de la escala según la desviación estándar.

Se muestra las tablas de frecuencias de cada variable:

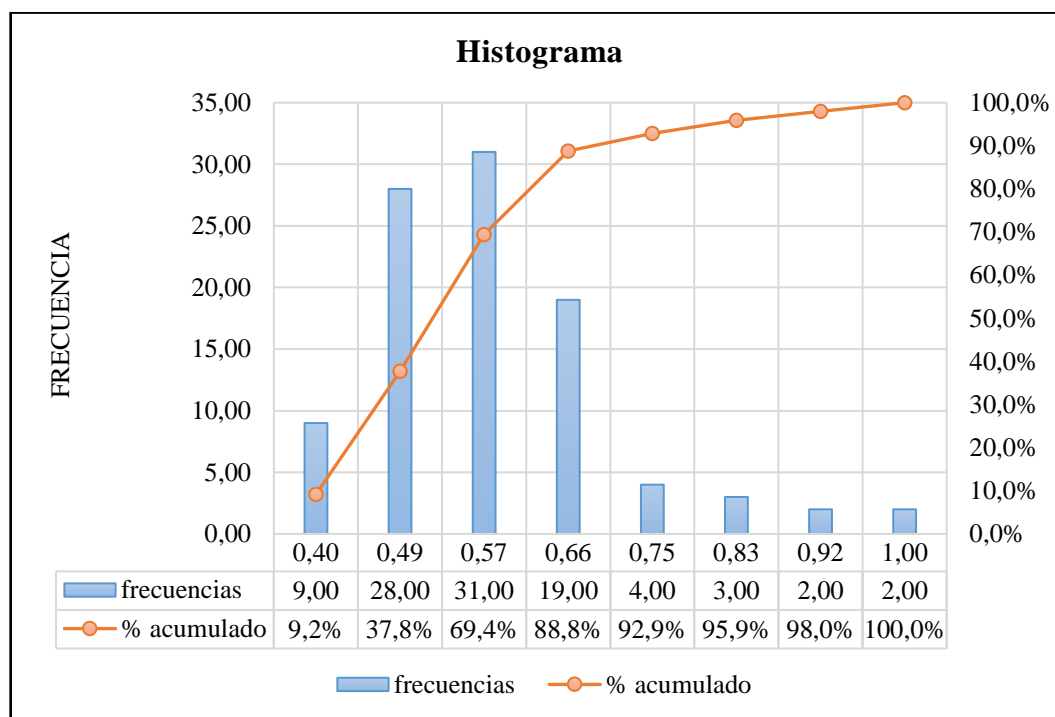
### 1. Variable independiente Macrotextura

**Tabla N° 34 Tabla de frecuencias de variable independiente macrotextura**

<b>Cálculos MTD</b>		<b>Tabla de frecuencias de la Macrotextura (mtd)</b>						
<b>N° Datos</b>	98,00	<b>Rangos de MTD</b>	<b>Marca</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>F acumulada</b>	<b>% de f</b>	<b>% acumulado</b>	
<b>Mínimo</b>	0,36	0,36	0,44	0,40	9,00	9,00	9,2%	
<b>Máximo</b>	1,05	0,44	0,53	0,49	28,00	37,00	28,6%	
<b>Rango</b>	0,69	0,53	0,62	0,57	31,00	68,00	31,6%	
<b>N° de intervalos</b>	8,00	0,62	0,70	0,66	19,00	87,00	19,4%	
<b>Amplitud</b>	0,09	0,70	0,79	0,75	4,00	91,00	4,1%	
		0,79	0,88	0,83	3,00	94,00	3,1%	
		0,88	0,96	0,92	2,00	96,00	2,0%	
		0,96	1,05	1,00	2,00	98,00	2,0%	
							100,0%	

**Fuente:** Elaboración propia

Gráfico N° 7 Histograma de variable independiente Macrotextura



Fuente: Elaboración propia

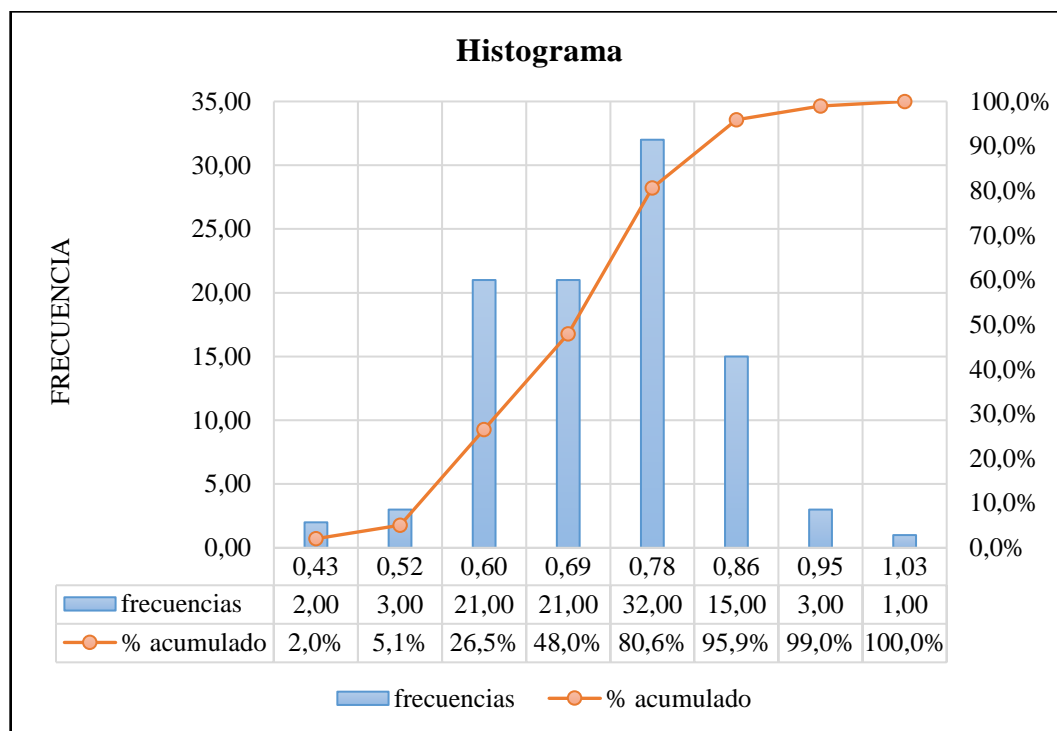
## 2. Variable dependiente Coeficiente de resistencia al deslizamiento

**Tabla N° 35 Tabla de frecuencias de variable dependiente coeficiente de resistencia al deslizamiento**

Cálculos c.d.r		Tabla de frecuencias del coeficiente de resistencia al deslizamiento (c.d.r)						
N° Datos	98,00	Rangos de CDR		Marca	Frecuencia	F acumulada	% de f	% acumulado
Mínimo	0,39	0,39	0,47	0,43	2,00	2,00	2,0%	2,0%
Máximo	1,08	0,47	0,56	0,52	3,00	5,00	3,1%	5,1%
Rango	0,69	0,56	0,65	0,60	21,00	26,00	21,4%	26,5%
N° de intervalos	8,00	0,65	0,73	0,69	21,00	47,00	21,4%	48,0%
Amplitud	0,09	0,73	0,82	0,78	32,00	79,00	32,7%	80,6%
		0,82	0,90	0,86	15,00	94,00	15,3%	95,9%
		0,90	0,99	0,95	3,00	97,00	3,1%	99,0%
		0,99	1,08	1,03	1,00	98,00	1,0%	100,0%

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 8 Histograma de variable dependiente coeficiente de resistencia al deslizamiento**



**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.5 Análisis de resultados de macrotextura y coeficiente de resistencia al deslizamiento**

En general el péndulo británico se aplicó, tanto en carril de ida como vuelta, cada cien metros se hizo un punto de medición, para un total de cinco lecturas en cada punto, lo que significó doscientas cincuenta lecturas en cada carril, para un total general de quinientas lecturas en todo el tramo.

En relación al círculo de arena en cada punto se realizaron cinco mediciones, lo que representó doscientas cincuenta lecturas en carril, para un total de quinientas mediciones.

Al aplicar las metodologías establecidas en las normas ASTM E-965 para la medición de la textura superficial de un pavimento por el método del círculo de arena y la metodología de la norma ASTM E-274 para la medición del coeficiente de resistencia al deslizamiento mediante el método del péndulo británico en el tramo carretero Tomatitas-Erquis de la provincia Méndez, con un punto inicial en la escuela de Tomatitas y como punto final la

comunidad de Erquis Sud; en un tramo comprendido de cinco kilómetros permitió como producto final determinar los siguientes resultados:

#### 4.5.1 Carril derecho (Ida)

**Tabla N° 36 Valores generales de resistencia al deslizamiento y macrotextura carril derecho**

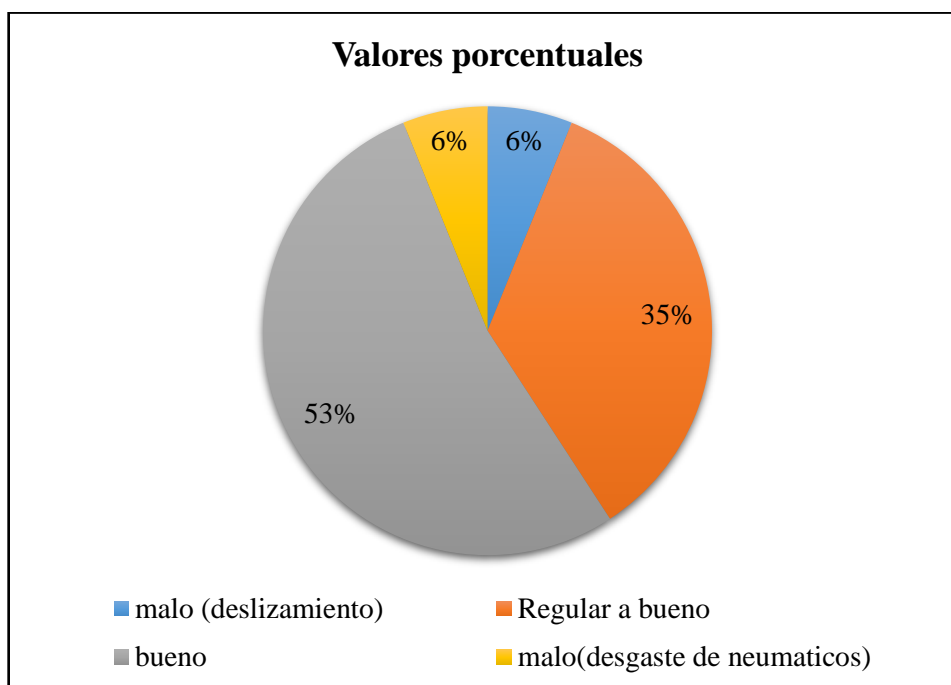
<b>Progresiva</b>	<b>coeficiente de resistencia al deslizamiento adim.</b>	<b>clasificación</b>	<b>Macrotextura mm</b>	<b>clasificación</b>
0+000	0.92	Malo	0.91	Gruesa
0+100	0.78	Bueno	0.77	Media
0+200	0.76	Bueno	0.85	Gruesa
0+300	0.79	Bueno	0.69	Media
0+400	0.80	Bueno	0.84	Gruesa
0+700	0.76	Bueno	0.64	Media
0+800	0.82	Bueno a regular	0.62	Media
0+900	1.08	Malo	0.49	Media
1+000	0.92	Malo	0.62	Media
1+100	0.57	Regular a bueno	0.68	Media
1+200	0.57	Regular a bueno	0.58	Media
1+300	0.59	Regular a bueno	0.52	Media
1+400	0.58	Regular a bueno	0.66	Media
1+500	0.61	Regular a bueno	0.56	Media
1+600	0.60	Regular a bueno	0.42	Media
1+700	0.61	Regular a bueno	0.39	Fina
1+800	0.54	Regular a bueno	0.54	Media
1+900	0.56	Regular a bueno	0.45	Media
2+000	0.69	Bueno	0.60	Media
2+100	0.58	Regular a bueno	0.48	Media
2+200	0.48	Malo	0.50	Media
2+300	0.40	Malo	0.54	Media
2+400	0.39	Malo	0.43	Media
2+500	0.58	Regular a bueno	0.42	Media
2+600	0.67	Bueno	0.62	Media
2+700	0.67	Bueno	0.54	Media
2+800	0.68	Bueno	0.60	Media
2+900	0.69	Bueno	0.52	Media
3+000	0.65	Bueno	0.66	Media
3+100	0.65	Bueno	0.49	Media
3+200	0.67	Bueno	0.57	Media
3+300	0.64	Bueno	0.68	Media
3+400	0.63	Bueno	0.56	Media
3+500	0.59	Regular a bueno	0.66	Media
3+600	0.58	Regular a bueno	0.53	Media
3+700	0.59	Regular a bueno	0.56	Media

3+800	0.65	Bueno	0.63	Media
3+900	0.66	Bueno	0.51	Media
4+000	0.67	Bueno	0.47	Media
4+100	0.60	Regular a bueno	0.41	Media
4+200	0.57	Regular a bueno	0.36	Fina
4+300	0.66	Bueno	0.43	Media
4+400	0.71	Bueno	0.48	Media
4+500	0.68	Bueno	0.49	Media
4+600	0.69	Bueno	0.51	Media
4+700	0.72	Bueno	0.43	Media
4+800	0.72	Bueno	0.50	Media
4+900	0.68	Bueno	0.49	Media
5+000	0.62	Bueno	0.57	Media
<b>Promedio</b>	<b>0.66</b>	<b>Bueno</b>	<b>0.56</b>	<b>Media</b>

**Fuente:** Elaboración propia

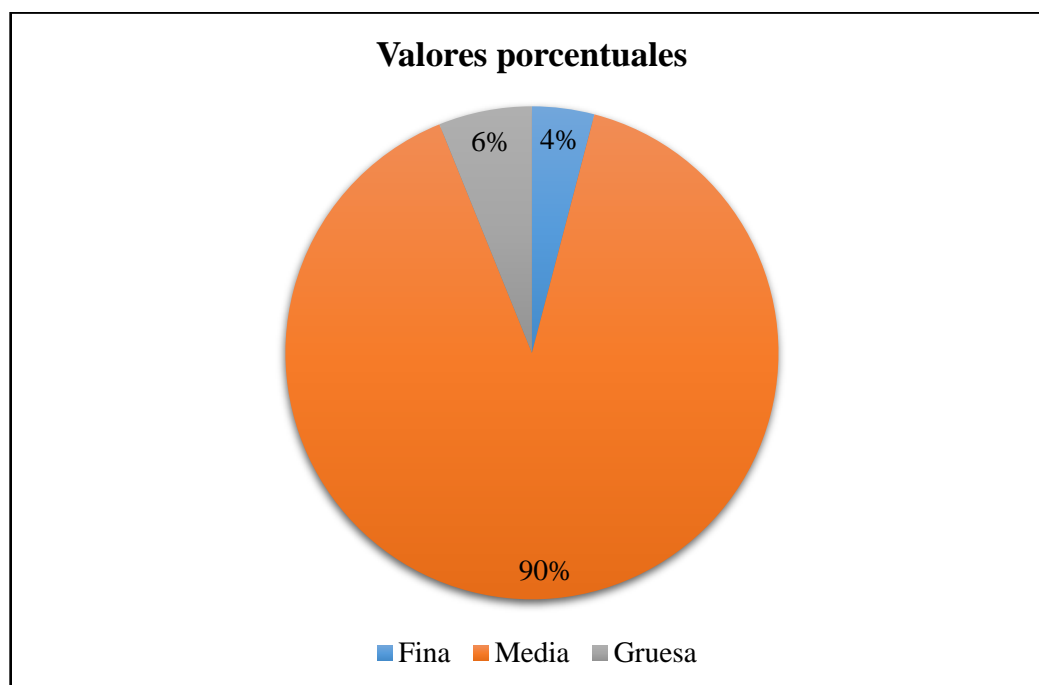
Los valores generales del coeficiente de resistencia al deslizamiento reflejan que de los cinco kilómetros analizados del carril derecho (Ida), tres (3) puntos de control clasificaron como malo (deslizamiento) siendo un 6,00%, oscilando los valores entre 0,39-0,48; diecisiete (17) puntos de control clasificaron como Regular a Bueno siendo un 35,00%, oscilando los valores entre 0,54-0,61; veintiséis (26) puntos de control clasificaron como Bueno siendo un 53,00%, oscilando los valores entre 0,62-0,80; ) y tres (3) puntos de control clasificaron como malo (desgaste de neumáticos) siendo un 6,00%, oscilando los valores entre 0,92-1,08; con un valor promedio del coeficiente de resistencia al deslizamiento de 0,66 clasificando la microtextura del pavimento en un estado de Bueno.

**Figura N° 24 Valores porcentuales de la resistencia al deslizamiento carril derecho**



**Fuente:** Elaboración propia

Los valores generales de la macrotextura reflejan que: dos (2) puntos de control clasificaron como Fina siendo un 4,00%, oscilando los valores entre 0,36-0,39; cuarenta y cuatro (44) puntos de control clasificaron como Media siendo un 90,00%, oscilando los valores entre 0,41-0,77 y tres (3) puntos de control clasificaron como Gruesa siendo un 6,00%, oscilando los valores entre 0,84-0,91; con un valor promedio de la macrotextura de 0,56 clasificando la macrotextura del pavimento en textura Media.

**Figura N° 25 Valores porcentuales de la macrotextura carril derecho**

**Fuente:** Elaboración propia

Estos datos muestran que la superficie de rodadura del pavimento se encuentra en buen estado, ofreciendo una adecuada adherencia neumático-pavimento, siendo esta una de las mayores causas de accidentes de esta carretera y un buen drenaje por parte de la macrotextura resultando en una mejor visibilidad de las marcas viales y una evacuación inmediata del agua superficial que redundaría en una mejora en la seguridad de operación, al evitarse el hidropneumático.

#### 4.5.2 Carril izquierdo (Vuelta)

**Tabla N° 37 Valores generales de resistencia al deslizamiento y macrotextura carril izquierdo**

Progresiva	coeficiente de resistencia al deslizamiento adm.	clasificación	Macrotextura mm	clasificación
0+000	0.84	Bueno a regular	0.86	Gruesa
0+100	0.77	Bueno	0.93	Gruesa
0+200	0.68	Bueno	1.04	Gruesa
0+300	0.63	Bueno	0.76	Media
0+400	0.71	Bueno	1.05	Gruesa
0+700	0.68	Bueno	0.63	Media

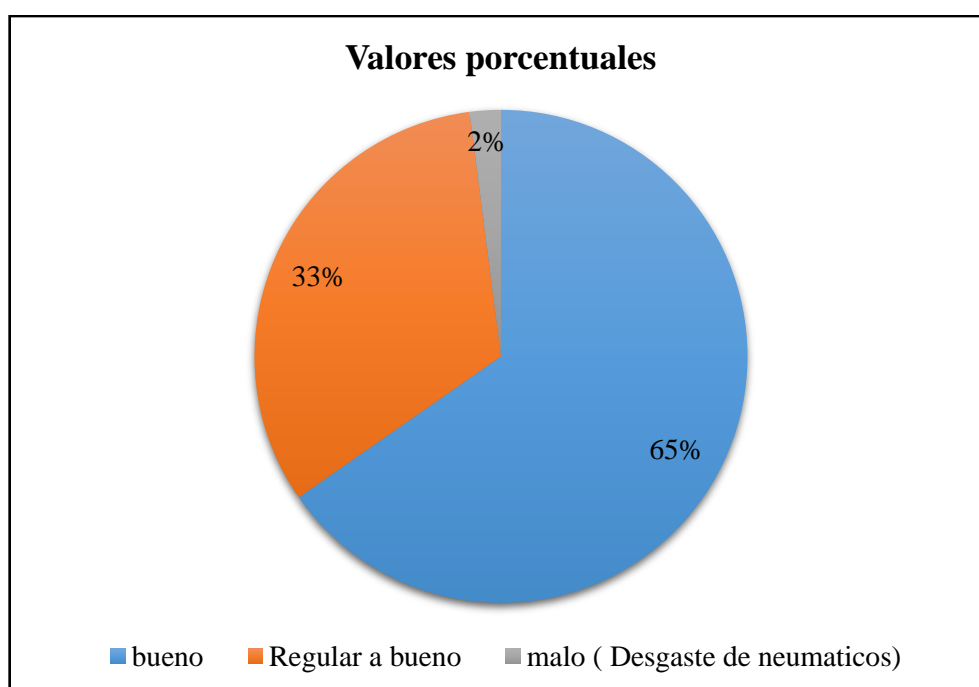


0+800	0.69	Bueno	0.62	Media
0+900	0.72	Bueno	0.66	Media
1+000	0.72	Bueno	0.53	Media
1+100	0.74	Bueno	0.54	Media
1+200	0.75	Bueno	0.54	Media
1+300	0.76	Bueno	0.60	Media
1+400	0.78	Bueno	0.51	Media
1+500	0.80	Bueno	0.48	Media
1+600	0.83	Bueno a regular	0.57	Media
1+700	0.86	Bueno a regular	0.76	Media
1+800	0.88	Bueno a regular	0.68	Media
1+900	0.86	Bueno a regular	0.55	Media
2+000	0.82	Bueno a regular	0.60	Media
2+100	0.78	Bueno	0.50	Media
2+200	0.77	Bueno	0.51	Media
2+300	0.79	Bueno	0.63	Media
2+400	0.79	Bueno	0.50	Media
2+500	0.79	Bueno	0.56	Media
2+600	0.78	Bueno	0.41	Media
2+700	0.79	Bueno	0.61	Media
2+800	0.85	Bueno a regular	0.51	Media
2+900	0.84	Bueno a regular	0.60	Media
3+000	0.93	Malo	0.49	Media
3+100	0.87	Bueno a regular	0.45	Media
3+200	0.85	Bueno a regular	0.51	Media
3+300	0.80	Bueno	0.71	Media
3+400	0.81	Bueno	0.61	Media
3+500	0.79	Bueno	0.57	Media
3+600	0.75	Bueno	0.63	Media
3+700	0.76	Bueno	0.69	Media
3+800	0.90	Bueno a regular	0.65	Media
3+900	0.87	Bueno a regular	0.56	Media
4+000	0.85	Bueno a regular	0.68	Media
4+100	0.81	Bueno	0.57	Media
4+200	0.79	Bueno	0.48	Media
4+300	0.79	Bueno	0.54	Media
4+400	0.76	Bueno	0.50	Media
4+500	0.79	Bueno	0.67	Media
4+600	0.78	Bueno	0.62	Media
4+700	0.80	Bueno	0.57	Media
4+800	0.84	Bueno a regular	0.65	Media
4+900	0.86	Bueno a regular	0.64	Media
5+000	0.87	Bueno a regular	0.51	Media
<b>Promedio</b>	<b>0,79</b>	<b>Bueno</b>	<b>0,61</b>	<b>Media</b>

Fuente: Elaboración propia

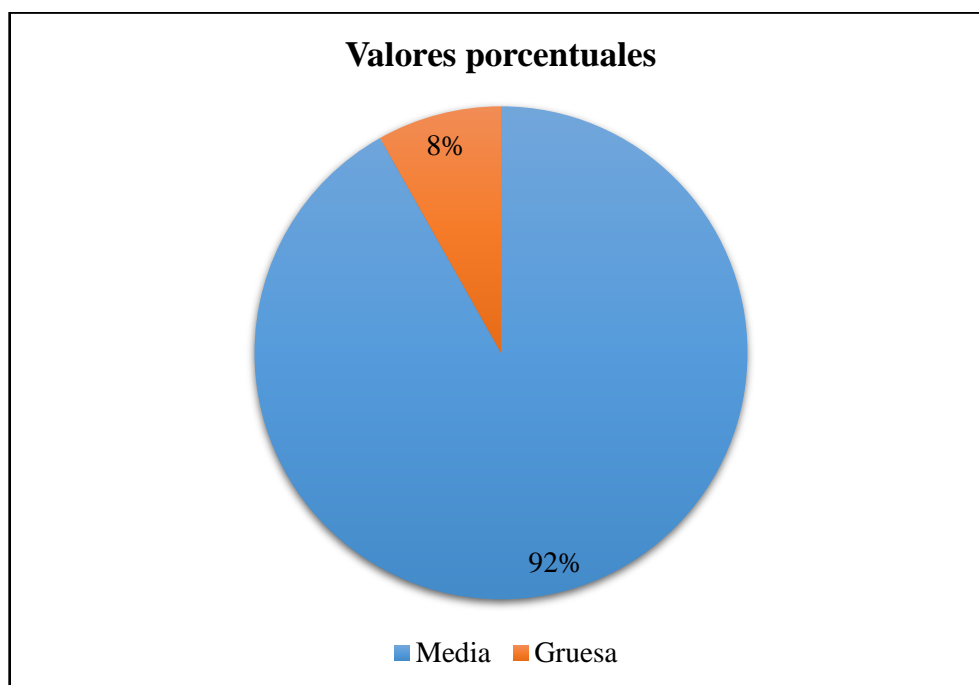
Los valores generales del coeficiente de resistencia al deslizamiento reflejan que del carril Izquierdo (Vuelta), treinta y dos (32) puntos de control clasificaron como Bueno siendo un 65,00%, oscilando los valores entre 0,63-0,81; dieciséis (16) puntos de control clasificaron como Regular a Bueno siendo un 33,00%, oscilando los valores entre 0,82-0,90 y un (1) solo punto de control clasifico como Malo siendo un 2,00%, oscilando su valor de 0,93; con un valor promedio del coeficiente de resistencia al deslizamiento de 0,79 clasificando la microtextura del pavimento en un estado de Bueno.

**Figura N° 26 Valores porcentuales de la resistencia al deslizamiento carril izquierdo**



**Fuente:** Elaboración propia

Los valores generales de la macrotextura del carril izquierdo reflejan que solo existe dos clases de textura en el carril: Cuarenta y cinco (45) puntos de control clasificaron como Media siendo un 92,00%, oscilando los valores entre 0,41-0,76 y cuatro (4) puntos de control clasificaron como Gruesa siendo un 8,00%, oscilando los valores entre 0,86-1,05; con un valor promedio de la macrotextura de 0,61 clasificando la macrotextura del pavimento en textura Media.

**Figura N° 27 Valores porcentuales de la macrotextura carril izquierdo**

**Fuente:** Elaboración propia

Estos resultados muestran que la superficie de rodadura del pavimento se encuentra en buen estado, ofreciendo una adecuada adherencia neumático-pavimento, siendo esta una de las mayores causas de accidentes de esta carretera y un buen drenaje por parte de la macrotextura resultando en una mejor visibilidad de las marcas viales y una evacuación inmediata del agua superficial que redundaría en una mejora en la seguridad de operación, al evitarse el hidropneumático.

Estas características del pavimento son un valor crítico en la seguridad vial, cuando el pavimento está mojado. Su medida y estudio es fundamental en carreteras de alta velocidad y/o elevada intensidad de tráfico.

#### 4.6 Análisis de resultados del IFI (índice de fricción internacional)

##### 4.6.1 Cálculo del IFI (F60, Sp)

Se calcula el IFI para cada carril del tramo Tomatitas-Erquis:

##### 1. Cálculo de la constante de velocidad (Sp)

$$Sp = a + b * Tx$$

Los valores de a y b constantes de calibración que depende del equipo usado, tomadas del estudio de la PIARC, en la presente investigación es la tabla 5.

$$a = -11.5981 \quad b = 113.63246$$

ejemplo de cálculo para la progresiva 0+000 del carril derecho (Ida)

datos:

$$Tx = 0,914 \text{ mm}$$

$$Sp = -11,5981 + 113,63246 * 0,914$$

$$Sp = 92,26 \text{ Km/h}$$

2. Cálculo del FR60 (fricción a 60 km/h sin armonizar), donde S= 10Km/h (velocidad de deslizamiento del patín de caucho), Sp=32.51 y FRs = c.d.r medido en campo.

$$FR60 = FRs * e^{\frac{S-60}{Sp}}$$

Ejemplo de calculo para la progresiva 0+000 del carril derecho (Ida)

Datos:

$$FRs = 92,12 \text{ adim.}$$

$$Sp = 92,26 \text{ Km/h}$$

$$S = 10 \text{ Km/h}$$

$$FR60 = 92,12 * e^{\frac{10-60}{92,26}}$$

$$FR60 = 53,58 \text{ adim.}$$

3. Cálculo del F60 (coeficiente de fricción armonizado a 60 Km/h)

$$F60 = A + (B * FR60)$$

Los valores de A y B constantes de calibración que depende del equipo usado, tomadas del estudio de la PIARC, en la presente investigación es la Tabla N°7.

$$A = 0.078 \quad B = 0.0107$$

Ejemplo de calculo para la progresiva 0+000 del carril derecho (Ida)

Datos:

**FR60** = 53,58 adim.

$$F60 = 0,078 + (0,0107 * 53,58)$$

$$F60 = 0,651 \text{ adim.}$$

4. Cálculo del coeficiente de fricción a diferentes velocidades, (S puede asumir cualquier velocidad, en este caso va variando de 0 a 120 Km/h).

$$F(s) = F60 * e^{\frac{60-s}{Sp}}$$

Ejemplo para una velocidad de 20 Km/h

Datos:

**S** = 20 Km/h

**F60** (promedio del F60 carril derecho) = 0,34 adim.

**Sp** (promedio del Sp carril derecho) = 52,10 Km/h

$$F(s) = 0,34 * e^{\frac{60-20}{52,10}}$$

$$F(s) = 0,74$$

A continuación, se muestran los resultados del IFI (F60, Sp) de cada carril:

#### 4.6.2 IFI (F60, Sp) del carril derecho (Ida)

**Tabla N° 38 Determinación del IFI carril derecho**

Progr.	c.d.r = FRs	H = Tx (mm)	Sp (Km/h)	FR60	F60
0+000	92,12	0,914	92,26	53,58	0,651
0+100	78,12	0,768	75,67	40,35	0,510
0+200	75,92	0,846	84,53	42,02	0,528
0+300	78,52	0,690	66,81	37,15	0,475
0+400	79,92	0,841	83,97	44,06	0,549
0+700	76,12	0,645	61,69	33,85	0,440
0+800	82,32	0,624	59,31	35,43	0,457

0+900	107,72	0,495	44,65	35,15	0,454
1+000	91,52	0,619	58,74	39,07	0,496
1+100	57,28	0,682	65,90	26,82	0,365
1+200	57,48	0,580	54,31	22,89	0,323
1+300	59,48	0,517	47,15	20,60	0,298
1+400	58,48	0,664	63,85	26,73	0,364
1+500	60,65	0,563	52,38	23,35	0,328
1+600	59,85	0,423	36,47	15,19	0,241
1+700	60,80	0,387	32,38	12,98	0,217
1+800	54,40	0,536	49,31	19,73	0,289
1+900	56,20	0,449	39,42	15,81	0,247
2+000	69,08	0,603	56,92	28,70	0,385
2+100	57,68	0,478	42,72	17,89	0,269
2+200	47,68	0,498	44,99	15,69	0,246
2+300	39,88	0,544	50,22	14,73	0,236
2+400	38,80	0,431	37,38	10,18	0,187
2+500	58,40	0,424	36,58	14,89	0,237
2+600	67,20	0,619	58,74	28,69	0,385
2+700	67,20	0,540	49,76	24,60	0,341
2+800	67,60	0,597	56,24	27,79	0,375
2+900	68,60	0,524	47,95	24,18	0,337
3+000	64,88	0,658	63,17	29,40	0,393
3+100	64,88	0,493	44,42	21,05	0,303
3+200	66,60	0,567	52,83	25,85	0,355
3+300	64,00	0,678	65,44	29,81	0,397
3+400	63,08	0,556	51,58	23,93	0,334
3+500	59,48	0,655	62,83	26,84	0,365
3+600	57,88	0,532	48,85	20,80	0,301
3+700	58,68	0,562	52,26	22,54	0,319
3+800	65,28	0,629	59,88	28,32	0,381
3+900	65,88	0,512	46,58	22,52	0,319
4+000	67,00	0,471	41,92	20,33	0,296
4+100	60,20	0,410	34,99	14,42	0,232
4+200	56,80	0,359	29,20	10,25	0,188
4+300	66,00	0,428	37,04	17,11	0,261
4+400	70,68	0,475	42,38	21,72	0,310
4+500	68,48	0,490	44,08	22,03	0,314
4+600	69,00	0,505	45,79	23,15	0,326
4+700	71,60	0,425	36,70	18,33	0,274
4+800	71,60	0,502	45,45	23,83	0,333
4+900	68,00	0,487	43,74	21,68	0,310
5+000	61,60	0,574	53,63	24,25	0,337
<b>Promedio</b>			<b>52,10</b>		<b>0,34</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Entonces el IFI (F60, Sp) del carril derecho (Ida) seria:

**IFI (0.34, 52.10)**

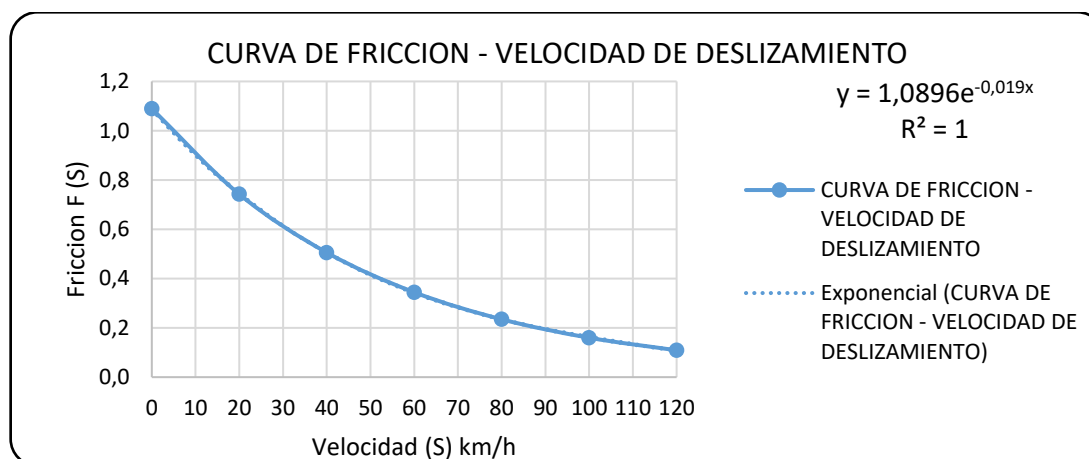
Se ve un resumen de coeficientes de fricción a diferentes velocidades en la siguiente tabla:

**Tabla N° 39 cálculo de fricción a diferentes velocidades carril derecho**

S	0	20	40	60	80	100	120
	<b>F(0)</b>	<b>F(20)</b>	<b>F(40)</b>	<b>F(60)</b>	<b>F(80)</b>	<b>F(100)</b>	<b>F(120)</b>
<b>F (S)</b>	1,090	0,742	0,506	0,344	0,235	0,160	0,109

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 9 Variación del coeficiente de fricción con la velocidad carril derecho**



Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.3 IFI (F60, Sp) del carril izquierdo (vuelta)

**Tabla N° 40 Determinación del IFI carril izquierdo**

Progr.	c.d.r = FRs	H = Tx (mm)	Sp (Km/h)	FR60	F60
0+000	83,92	0,863	86,47	47,07	0,582
0+100	76,92	0,932	94,31	45,27	0,562
0+200	67,72	1,044	107,03	42,45	0,532
0+300	63,12	0,762	74,99	32,40	0,425
0+400	70,92	1,047	107,38	44,52	0,554
0+700	68,12	0,627	59,65	29,46	0,393
0+800	69,12	0,623	59,19	29,70	0,396
0+900	71,72	0,658	63,17	32,50	0,426
1+000	71,52	0,531	48,74	25,64	0,352
1+100	74,12	0,543	50,10	27,32	0,370
1+200	75,12	0,542	49,99	27,63	0,374
1+300	75,72	0,597	56,24	31,12	0,411
1+400	77,72	0,511	46,47	26,50	0,362
1+500	80,12	0,485	43,51	25,39	0,350

1+600	82,72	0,568	52,95	32,17	0,422
1+700	86,12	0,760	74,76	44,12	0,550
1+800	87,52	0,676	65,22	40,66	0,513
1+900	85,92	0,551	51,01	32,24	0,423
2+000	81,92	0,597	56,24	33,67	0,438
2+100	78,12	0,502	45,45	26,00	0,356
2+200	76,72	0,514	46,81	26,36	0,360
2+300	78,92	0,628	59,76	34,19	0,444
2+400	78,92	0,498	44,99	25,97	0,356
2+500	78,92	0,556	51,58	29,94	0,398
2+600	78,21	0,414	35,45	19,08	0,282
2+700	78,61	0,606	57,26	32,83	0,429
2+800	84,61	0,513	46,70	29,00	0,388
2+900	84,21	0,595	56,01	34,49	0,447
3+000	93,20	0,491	44,20	30,07	0,400
3+100	87,40	0,455	40,10	25,12	0,347
3+200	84,60	0,513	46,70	29,00	0,388
3+300	80,40	0,708	68,85	38,89	0,494
3+400	80,80	0,614	58,17	34,21	0,444
3+500	79,00	0,572	53,40	30,97	0,409
3+600	74,60	0,634	60,44	32,62	0,427
3+700	75,80	0,690	66,81	35,86	0,462
3+800	90,20	0,652	62,49	40,52	0,512
3+900	86,60	0,557	51,70	32,92	0,430
4+000	84,80	0,676	65,22	39,39	0,500
4+100	80,60	0,574	53,63	31,73	0,417
4+200	79,40	0,477	42,60	24,56	0,341
4+300	78,60	0,543	50,10	28,98	0,388
4+400	75,80	0,504	45,67	25,36	0,349
4+500	78,80	0,672	64,76	36,41	0,468
4+600	77,80	0,620	58,85	33,27	0,434
4+700	79,80	0,567	52,83	30,97	0,409
4+800	84,48	0,653	62,60	38,01	0,485
4+900	85,88	0,640	61,13	37,90	0,484
5+000	87,48	0,514	46,81	30,06	0,400
Promedio =			<b>58,13</b>		<b>0,42</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Entonces el IFI (F60, Sp) del carril Izquierdo (vuelta) sería:

**IFI (0.42, 58.13)**

Se ve un resumen de coeficientes de fricción a diferentes velocidades en la siguiente tabla:

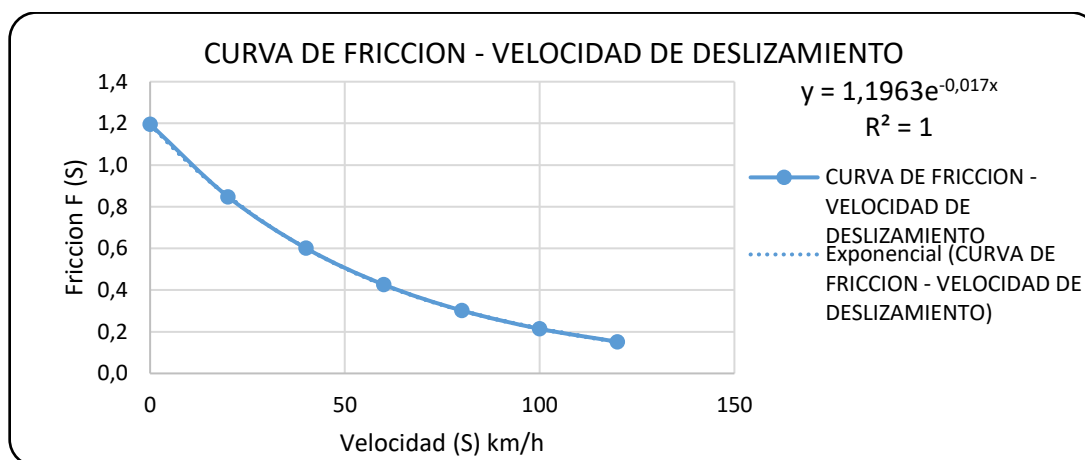


**Tabla N° 41 Cálculo de fricción a diferentes velocidades carril izquierdo**

S	0	20	40	60	80	100	120
	<b>F(0)</b>	<b>F(20)</b>	<b>F(40)</b>	<b>F(60)</b>	<b>F(80)</b>	<b>F(100)</b>	<b>F(120)</b>
F (S)	1,196	0,848	0,601	0,426	0,302	0,214	0,152

Fuente: Elaboración propia

**Gráfico N° 10 Variación del coeficiente de fricción con la velocidad carril izquierdo**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 42 Resultados del IFI, calificación de textura y fricción**

Carril derecho (ida)						
Resultados del IFI (índice de fricción internacional)						
Tramo:		Tomatitas-Erquis				
Progresiva		Muestra	IFI (F60, Sp)		Calificación de textura	Calificación de fricción
Inicial	Final		F60	Sp (Km/h)		
0+000	5+000	Promedio	0,34	52,10	Media	bueno
Carril Izquierdo (vuelta)						
Resultados del IFI (índice de fricción internacional)						
Tramo:		Tomatitas-Erquis				
Progresiva		Muestra	IFI (F60, Sp)		Calificación de textura	Calificación de fricción
Inicial	Final		F60	Sp (Km/h)		
0+000	5+000	Promedio	0,43	58,13	Media	bueno

Fuente: Elaboración propia

La textura se observa pulida, por tanto, sus valores de Sp dan en promedio cercanos de 50 km/h a excepción de algunos puntos donde el Sp son mayores a 90 km/h, esto debido a que en esos puntos la textura es abierta.

Por otra parte, también debe mencionarse que la velocidad de operación segura en los carriles tomando en cuenta una fricción mínima según la ABC de 0,373 fue:

- **Para el carril derecho.** - velocidad máxima segura = 56,42 Km/h
- **Para el carril izquierdo.** - velocidad máxima segura = 68,55 Km/h

#### **4.7 Propuestas en el tramo estudiado respecto a los parámetros de investigación en el presente y futuro**

En las obras viales se debe cumplir un correcto mantenimiento, ya que, al no cumplir con éste en los tiempos adecuados y solicitados en el expediente técnico, el daño que se causaría al pavimento sería grave y se presentarían fallas dejando una vía deteriorada, por ello es necesario dar a conocer una solución práctica, económica y de larga duración que permita el correcto funcionamiento del pavimento a lo largo de toda su vida útil.

Actualmente el tramo en estudio se encuentra en buenas condiciones, esto debido a los resultados de macrotextura y microtextura realizados; Los valores generales del coeficiente de resistencia al deslizamiento reflejan que de los cinco kilómetros analizados tanto para carril derecho como para carril izquierdo tienen un promedio de 0,73 adim. con una clasificación de Bueno, y la macrotextura con un valor promedio de 0,59 mm clasificándose en una macrotextura Media.

Tanto caminos como carreteras sufren de un deterioro permanente, el cual sucede por distintos agentes en su mayoría relacionados con la naturaleza, por ejemplo, el agua y el propio tránsito de vehículos. Todos ellos inciden sobre la obra en mayor o menor medida, sin importar su origen, el deterioro de una camino o carretera tiene diferentes etapas; las cuales van desde una etapa inicial con el desgaste lento y poco visible, hasta llegar a una etapa crítica en la que las condiciones para hacer uso de la infraestructura son muy poco viables.

Es muy importante destacar que la conservación de carreteras es una acción que debe ser periódica, y es que el camino va experimentando un proceso de desgaste y debilitamiento lento, principalmente en la superficie de rodadura. A este tipo de situaciones no se les puede restar importancia, ya que es la única forma de prevenir un desgaste mayor en los proyectos.

A continuación, se mencionan dos técnicas que podrían ser utilizadas para mejorar el coeficiente de fricción de una carretera a futuro:

#### **4.7.1 Tratamientos superficiales simple**

Esta técnica, en su variante más sencilla, se define como una aplicación uniforme de un ligante asfáltico, usualmente emulsión asfáltica, cubierta por una capa uniforme de agregados de igual tamaño (Gransberg, 2005).

Los beneficios que se obtienen de la construcción de tratamientos superficiales se destacan a continuación (Webb, 2010):

- Permiten disponer de una superficie uniforme.
- Sirven para impermeabilizar la estructura de pavimento existente, con lo cual se protegen las capas subyacentes.
- Permiten aumentar el coeficiente de fricción de la carretera.

Sobre este último aspecto, los agregados tienen la función de proveer la textura deseada en los tratamientos superficiales, por lo tanto, son los encargados de aumentar el coeficiente de fricción de la carretera y resistir la abrasión producto del tráfico. De este modo, con la colocación de un tratamiento superficial, se contará con una nueva macro y microtextura cuya evolución en el tiempo depende de las características del agregado colocado en la capa superficial del tratamiento.

Los tratamientos superficiales son una alternativa para preservar el buen estado de una carretera y mejorar algunas de sus características. Esta solución ha sido reconocida por su buena relación costo/ desempeño, facilidad de colocación y porque puede emplearse sobre casi cualquier tipo de pavimento. A nivel mundial, los tratamientos superficiales han sido ampliamente utilizados para mejorar el estado de las carreteras.

Con el objetivo de disminuir los costos de mantenimiento, eliminar las irregularidades y mejorar las características de fricción en el pavimento, se propone la necesidad de hallar una alternativa accesible para el mantenimiento de este tramo. Pero como principal limitante, este municipio cuenta con un presupuesto ajustado, que no le permite considerar propuestas de costos elevados.

Una de las soluciones propuestas para mejorar el estado de la red vial es colocar un tratamiento superficial simple. Lo anterior a realizar a lo largo de la carretera Tomatitas-Erquis, con un tránsito compuesto principalmente por vehículos que realizan labores agropecuarias.

#### **4.7.2 Micropavimento**

Al igual que con los tratamientos superficiales, es posible aumentar la textura superficial de una carretera mediante otras técnicas de preservación como el uso de micropavimento. Esta técnica consiste en la colocación de una mezcla entre agua, emulsión asfáltica y agregado fino sobre la carretera, permitiendo obtener una nuevo micro y macrotectura superficial.

Con una nueva técnica que promete ahorro en el pavimento de las calles de las ciudades y carreteras del país, la empresa COINSER fabrica un impermeabilizador para alargar la vida útil de las vías y que reduce costos en 50%. Se trata de un micropavimento en frío con emulsión modificada con polímeros que se emplea en lugar de la técnica tradicional de sobreponer carpetas asfálticas.

Hasta ahora, lo tradicional es preparar concreto en caliente junto a los agregados y colocar una carpeta de cinco centímetros para el mantenimiento de calles y carreteras y agregar otras al cabo de algunos años.

En el país, se implementó esta técnica en varias carreteras, pero con productos importados. La novedad es que en la actualidad el material requerido se produce en Bolivia gracias a COINSER, para impulsar esta novedosa técnica, la compañía importó de Brasil una micropavimentadora.

Los micropavimentos son una solución de mantenimiento económico capaz de extender el ciclo de vida del pavimento al restaurar una contribución significativa en términos de seguridad (resistencia al deslizamiento) y proporcionar, en este caso, reducción de ruido.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Después de haber estudiado, realizado la práctica del coeficiente de resistencia al deslizamiento y calculado el índice de fricción internacional, podemos hacer las siguientes conclusiones del estudio:

- Se realizó la medición del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (c.d.r), en el tramo descrito anteriormente, la práctica se la realizo en la huella derecha de la carretera con presencia de agua sobre la calzada del tramo, ya que esta sería la condición más crítica de servicio, como así también el ensayo del Círculo de arena.
- Se aplicó la metodología de trabajo que se expone en la norma ASTM E 965 para la medición de la textura superficial de un pavimento por el método del círculo de arena clasificando la macrotextura del pavimento desde el colegio de Tomatitas hasta Erquis Sud como Media.
- Se aplicó la metodología de trabajo que se expone en la norma ASTM E 274 para la medición del coeficiente de resistencia al deslizamiento mediante el método del péndulo británico clasificando la macrotextura del pavimento desde el colegio de Tomatitas hasta Erquis Sud como Bueno.
- Se realizó el análisis de la relación entre las variables usando correlaciones lineales y no lineales, mediante el programa STATGRAPHICS centurión que es un conjunto de herramientas de tratamiento de datos para el análisis estadístico.
- Los resultados de la correlación del análisis MTD vs. c.d.r, utilizando los valores promedios de cada progresiva, muestran una **relación ALTA A MUY ALTA**, debido al valor del coeficiente de correlación de cada rango de macrotextura se encuentra entre 0,70 – 0,90. Considerando el signo positivo, las variables en mención están directamente relacionados en un nivel alto, se puede afirmar que mientras el c.d.r aumenta la MTD incrementa.

**Tabla N° 43 Resultados del coeficiente de correlación y de determinación**

N°	Rango de Macrotextura (mm)	Tipo de Correlación	r	r <sup>2</sup>
1	0,59 a 0,90	Doble inverso	0,790	62,48%
2	0,57 a 0,59	Doble inverso	0,856	73,283%
3	0,46 a 0,57	Doble inverso	0,860	73,998%

**Fuente:** Elaboración propia

De este modo, se concluye que la relación es lo suficientemente buenas, permitiendo alegar que es útil emplear los valores de MTD (Macrotextura) obtenidos con el método Círculo de arena para calcular el coeficiente de resistencia al deslizamiento en el tramo estudiado. Este resultado se puede atribuir a que existe una buena relación entre los datos obtenidos de c.d.r y MTD.

A partir del análisis precedente, se muestra que la correlación entre el coeficiente de resistencia al deslizamiento y la macrotextura del tramo es **Aceptable**, esto debido a que el r<sup>2</sup> son mayores a 60%, se observa una tendencia lineal clara con un modelo denominado Doble Inverso.

A la vista del resultado analítico podemos afirmar que el ajuste de los modelos es óptimo, ya que el valor de r<sup>2</sup> es cercano a 1, en concreto, el 60% de la variabilidad de la variable Y a su promedio es explicado por el modelo de regresión ajustado.

- Determinado el nivel de correlación entre las variables, resultando r (coeficiente de correlación) mayores a 0,70 que corresponde a un nivel de correlación alta a muy alta y hallado el valor-P (Significancia) de cada modelo de regresión, se observa que está fuera de la aceptación de la hipótesis nula quedando rechazada y se acepta la hipótesis alterna, se determina entonces que:

*“Hay correlación entre Macrotextura y coeficiente de resistencia al deslizamiento del tramo Tomatitas-Erquis”.*

**Tabla N° 44 Valor-P de los modelos elaborados**

N°	Rango de Macrotextura (mm)	Tipo de Correlación	Ecuación	Valor-P
1	0,59 a 0,90	Doble inverso	$c. d. r = \frac{1}{(0,719 + \frac{0,446}{MTD})}$	0,0065
2	0,57 a 0,59	Doble inverso	$c. d. r = \frac{1}{(-11,60 + \frac{7,407}{MTD})}$	0,0072
3	0,46 a 0,57	Doble inverso	$c. d. r = \frac{1}{(0,381 + \frac{0,515}{MTD})}$	0,0002

**Fuente:** Elaboración propia

- Mediante el método propuesto por la PIARC, se calculó el IFI tanto para carril derecho como para el izquierdo:

➤ resultado para el carril derecho (Ida):

$$\text{IFI (0.34, 52.10)}$$

Se puede apreciar que Sp es menor a 100, por lo tanto, el carril derecho tiene una textura cerrada, usando la ecuación de la curva fricción-velocidad de deslizamiento se calculó el valor de fricción a distintas velocidades, y se estableció con una fricción mínima recomendada por la ABC de 0,373 que la velocidad máxima segura en el carril derecho es de 56,42 km/hr.

➤ resultado para el carril Izquierdo (Vuelta):

$$\text{IFI (0.42, 58.13)}$$

Se puede apreciar que Sp es menor a 100, por lo tanto, el carril izquierdo tiene también una textura cerrada, usando la ecuación de la curva fricción-velocidad de deslizamiento se calculó el valor de fricción a distintas velocidades, y se estableció con una fricción mínima recomendada por la ABC de 0,373 que la velocidad máxima segura en el carril izquierdo es de 68,55 km/hr.

- El control de las variables extrañas como ser la temperatura y el clima fue exitosa, ya que para la temperatura se hizo las correcciones pertinentes para el cálculo, se usó el coeficiente de temperatura  $F_{c20^\circ}$  en cada una de las lecturas homogeneizando estas a 20 °C, además, durante la medición las temperaturas de la superficie se encontraron



en el rango de 5°C a 40°C, ya que de no ser así se produciría alteración en las mediciones.

## **5.2 Recomendaciones**

- Se recomienda mantener constante el suministro de agua sobre el pavimento durante el ensayo de medición del coeficiente de resistencia al deslizamiento (péndulo británico) incluso con cualquier otro equipo, esto para evitar la dispersión en los valores y resultados obtenidos, ya que la variación de esta influencia en el coeficiente de fricción final.
- Evitar hacer la práctica en días que se encuentren con mucho viento, esto puede alterar los resultados del círculo de arena y usar un buen equipo de señalización vial para evitar percances con los conductores de los vehículos.
- Previo a realizar este tipo de ensayos, la persona deberá recibir una capacitación intensiva, teórica y práctica sobre la manipulación de los equipos requeridos para dicha evaluación como también los procedimientos de medición y cálculos establecidos, con la finalidad de evitar contratiempos no programados y así lograr obtener los resultados más satisfactorios posibles.
- Se recomienda disminuir la velocidad a velocidades menores de 60 Km/h en épocas de lluvia o cuando la superficie del pavimento se encuentre mojada.
- Finalmente, se puede aplicar las metodologías detalladas anteriormente en un estudio similar para el pavimento rígido, ya que el presente proyecto se enfocó en el análisis de la relación CDR vs. MTD de un pavimento flexible. Se podría emplear este procedimiento en un tramo carretero del departamento de Tarija como es la carretera Tarija-Camargo.