

**PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL
COEFICIENTE DE FRICCIÓN ENTRE EL NEUMÁTICO Y LA CALZADA DE
UN PAVIMENTO**

JUAN MANUEL COVALEDA PILLIMUE

MARIA VICTORIA FLOREZ DOMINGUEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA

SANTIAGO DE CALI

JULIO DE 2011

**PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL
COEFICIENTE DE FRICCIÓN ENTRE EL NEUMÁTICO Y LA CALZADA DE
UN PAVIMENTO**

JUAN MANUEL COVALEDA PILLIMUE

MARIA VICTORIA FLOREZ DOMINGUEZ

Proyecto de grado para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL

Director: Prof. DIEGO DUQUE ARANGO

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA

SANTIAGO DE CALI

JULIO DE 2011

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	8
1 INTRODUCCIÓN	9
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3 OBJETIVOS	12
3.1 GENERAL	12
3.2 ESPECIFICOS	12
4 JUSTIFICACIÓN	13
5 ANTECEDENTES	14
6 CONCEPTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS	16
6.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS	16
6.2 TIPOS DE PAVIMENTOS	17
6.2.1 Pavimentos flexibles	17
6.2.2 Pavimentos rígidos	18
6.2.3 Pavimentos semi-rígidos	19
6.2.4 Pavimentos articulados	19
6.3 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS	20
6.3.1 Procedencia de materiales	21
6.3.1.1 Áridos o agregados	21
6.3.1.2 Ligantes	22
6.3.2 Propiedades fundamentales de los materiales	23
6.3.2.1 Propiedades de los suelos para su clasificación	23
6.3.2.1.1 Granulometría	23
6.3.2.1.2 Plasticidad	23
6.3.2.1.3 Otras propiedades	24
6.3.2.2 Propiedades de los áridos para su caracterización	24
6.3.2.2.1 Granulometría de los áridos	24
6.3.2.2.2 Rozamiento interno y cohesión	25
6.3.2.2.3 Propiedades específicas del árido grueso	25
6.3.2.3 Características generales y clasificación de los ligantes	28
6.3.2.4 Tipos de mezclas bituminosas	29
6.3.2.5 Propiedades generales de las mezclas bituminosas	30
6.4 ESTRUCTURA Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA DOBLE CALZADA LA PAILA-ZARZAL	32
6.5 EVALUACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO	38
6.5.1 Tipos de fallas en los pavimentos	39
7 COEFICIENTE DE FRICCIÓN	42

7.1	¿QUE ES EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN?	42
7.2	¿DE QUE DEPENDE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN?	42
7.3	TIPOS DE FUERZAS DE FRICCIÓN	43
7.4	MODELO DE FUERZAS ACTUANTES (DCL)	43
7.5	LEYES DEL ROZAMIENTO	44
7.6	FRICCIÓN EN PAVIMENTOS	45
7.7	FACTORES QUE AFECTAN LA ADHERENCIA EN UN PAVIMENTO	46
7.8	EVALUACIÓN DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE UN PAVIMENTO	49
7.8.1	MEDICIÓN DE LA TEXTURA POR MEDIO DE LA PRUEBA DEL CÍRCULO DE ARENA	52
7.8.1.1	Descripción de la prueba del círculo de arena	52
7.8.1.2	Equipo	53
7.8.1.3	Procedimiento	54
7.8.2	MEDICIÓN DE LA FRICCIÓN POR MEDIO DEL PÉNDULO INGLÉS	56
7.8.2.1	Descripción	56
7.8.2.2	Equipo	57
7.8.2.3	Procedimiento de ensayo	58
7.8.2.4	Cálculo	59
7.8.2.5	Rangos de fricción	60
7.8.3	PERFILOMETRO LASER	61
7.8.4	EL SIDEWAY COEFFICIENT ROUTINE INVENTORY MACHINE "SCRIM"	61
7.8.5	EL MU-METER	62
7.8.6	MEDIDA DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE UN PAVIMENTO MEDIANTE LA REGLA DE 3m.	63
7.9	VALORES MINIMOS NORMAS INTERNACIONALES	64
7.10	PROCEDIMIENTOS RECONOCIDOS POR INVIAS	66
8	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO IMPLEMENTADO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN	68
9	PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN ENTRE EL NEUMÁTICO Y LA CALZADA DE UN PAVIMENTO	72
10	FASE EXPERIMENTAL	76
10.1	ENSAYOS DE CALIBRACION MAQUINA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN PAVIMENTOS	76
10.2	LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS ESTUDIADAS	77
10.3	PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	87
10.4	RESULTADOS OBTENIDOS	92
10.5	PRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS	97
11	ANÁLISIS DE RESULTADOS	98

12	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
13	ANEXOS	107
14	BIBLIOGRAFÍA	115

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estructura y espesores utilizados en la doble calzada	32
Tabla 2. Requerimientos generales mezclas bituminosas	34
Tabla 3. Tipo de ligante a emplear en capa de rodadura y siguiente	34
Tabla 4. Tipo de ligante a emplear en capa de base bajo otras dos	35
Tabla 5. Rangos granulométricos % acumulado	35
Tabla 6. Tipos de mezclas y espesor de las capas	36
Tabla 7. Índice de Regularidad Internacional (IRI) (dm/mm) para firmes de nueva construcción.	36
Tabla 8. Macrotextura superficial (NLT-335) y Resistencia al deslizamiento (NLT-336) de las mezclas para capas de rodadura.	37
Tabla 9. Rangos granulométricos de los agregados – INVIAS Artículo 450-02	37
Tabla 10. Especificaciones ligante CRR-1	38
Tabla 11. Deterioros pavimentos flexibles	40
Tabla 12. Fallas pavimento rígido	41
Tabla 13. Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento – Clima	46
Tabla 14. Factores que afectan la adherencia N-P	47
Tabla 15. Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento – Transito.	48
Tabla 16. Indicadores de Textura y Fricción	51
Tabla 17. Ventajas y desventajas Ensayo del Circulo de Arena	56
Tabla 18. Criterio para evaluar los valores de fricción en la superficie de pavimentos	60
Tabla 19. Ventajas y desventajas Ensayo Péndulo Ingles	60
Tabla 20. Coeficiente de fricción en Chile medido con el equipo SCRIM	64
Tabla 21. Ensayos reconocidos por norma INVIAS	66
Tabla 22. Medidas de tendencia central	98
Tabla 23. Valores p de la prueba de rachas para los promedios y los rangos	102
Tabla 24. Desviación estándar para los diferentes tramos de carretera	102

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Estructura pavimento flexible	18
Imagen 2. Estructura pavimento rígido	18
Imagen 3. Estructura pavimento articulado	20
Imagen 4. Proceso de extracción de los áridos	22
Imagen 5. Modelo de fuerzas actuantes	43
Imagen 6. Clasificación de la textura superficial según AIPCR	48
Imagen 7. Ensayos puntuales	50
Imagen 8. Ensayos de medida continua GRIPTESTER	51
Imagen 9. Ensayos de medida continua SCRIM	51
Imagen 10. Esquema de ensayo del círculo de arena	52
Imagen 11. Péndulo de fricción británico (ASTM E 274)	57
Imagen 12. Factor de corrección por temperatura péndulo inglés	59
Imagen 13. Esquema del equipo SCRIM	62
Imagen 14. Medida de la irregularidad superficial mediante la regla de tres metros	63
Imagen 15. Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF)	68-73
Imagen 16. Componentes Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF)	69
Imagen 17. Localización general de ensayos Universidad del Valle	77
Imagen 18. Ensayos P 1 – P 7 pavimento rígido (PR) Univalle	78
Imagen 19. Ensayos P 7 – P35 pavimento rígido (PR) Univalle	79
Imagen 20. Ensayos P36 – P60 pavimento rígido (PR) Univalle	80
Imagen 21. Ensayos P61 – P74 pavimento flexible (PF) Univalle	81
Imagen 22. Ensayos P75 – P80 pavimento rígido (PR) Univalle	82
Imagen 23. Ubicación general Zarzal –Valle	83
Imagen 24. Mapa de obras concesionario PISA S.A.	83
Imagen 25. Dimensiones de la vía	85
Imagen 26. Calzada nueva vía La Paila – Zarzal	86
Imagen 27. Calzada vieja vía La victoria - Zarzal	86

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Dispersión total – resultados obtenidos	97
Gráfica 2. Control para el Coeficiente de Fricción sobre la calzada vieja de Zarzal	99
Gráfica 3. Control para el Coeficiente de Fricción sobre la calzada nueva de Zarzal	99
Gráfica 4. Control para el Coeficiente de Fricción sobre pavimento rígido de Univalle	100
Gráfica 5. Control para el Coeficiente de Fricción sobre pavimento flexible de Univalle	101

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1 EDCF real	70
Fotografía 2 Instalación completa EDCF	70
Fotografía 3 Motor EDCF	71
Fotografía 4 Lectura en el anillo de carga	71
Fotografía 5 Calzada vieja vía La Victoria – Zarzal Valle	84
Fotografía 6 Calzada nueva vía La Victoria – Zarzal Valle	84
Fotografía 7 Calzada nueva vía La Victoria – Zarzal Valle	84
Fotografía 8 Preparación superficie a estudiar	87
Fotografía 9 Montaje del equipo en la zona de estudio	88
Fotografía 10 Instalación completa del equipo	88
Fotografía 11 Seguridad operario	89
Fotografía 12 Funcionamiento planta eléctrica	89
Fotografía 13 Desplazamiento maquina	90
Fotografía 14 Lectura anillo de carga	90
Fotografía 15 Desmonte equipo	91

RESUMEN

La Fricción en los pavimentos es un factor importante en la seguridad y diseño vial, por esta razón contar con nuevos dispositivos que faciliten la determinación de dicho coeficiente es importante.

Este trabajo de grado contiene la descripción del Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF) y el procedimiento de ensayo utilizado. Como primer paso se definió un conjunto de vías en la Universidad del Valle, las cuales presentan distintas condiciones de diseño y características del pavimento, después se realizaron ensayos que permitieron medir el coeficiente de fricción en pavimentos flexibles en diferentes vías que conducen al Norte del Valle.

Las mediciones obtenidas con el EDCF, y aplicadas en diferentes puntos a distancias establecidas según la vía en estudio, permitieron estimar un rango promedio y aceptable del coeficiente de fricción.

1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia se han realizado grandes avances tecnológicos, logrando formas cada vez más rápidas y confortables de desplazamiento, permitiendo alcanzar amplias distancias en tiempos cada vez menores. Dicho avance ha logrado avances significativos tanto en materiales como en procedimientos usados en la construcción de vías terrestres. En la actualidad contamos con varios tipos de pavimentos tales como: rígido, flexible, semi-rígidos y los articulados, siendo el más utilizado en vías de gran envergadura el concreto asfáltico a base de bitumen, como es el caso de las vías en operación del concesionario Proyectos de Infraestructura PISA S.A.

Dichas vías deben ser resistentes a la acción de las cargas impuestas por el tráfico y al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos y a los agentes de intemperismo. Debe presentar una textura superficial adecuada, una regularidad superficial tanto transversal como longitudinal que permita una adecuada comodidad a los usuarios, debe ser económica, y poseer un color apropiado para evitar reflejos.

La textura superficial de un pavimento es el factor que más influye en el número de accidentes de tráfico en una carretera. Una mala textura en el pavimento ocasiona a largo plazo el fallo de la sección estructural, que influye en la seguridad del usuario. Aunque existen equipos destinados a determinar la resistencia de los pavimentos al deslizamiento tanto puntuales como de medida continua, en la zona del suroccidente colombiano solo la Universidad del Cauca posee un equipo de medida de textura (péndulo británico TRL).

Garantizar tal seguridad vial es un tema que se estudia en muchos países tales como Argentina, Chile, Estados Unidos, México, donde se han realizado diferentes estudios y ahora en nuestro país se busca reducir la accidentalidad, en donde uno de los factores que más influye es la falta de adherencia neumático-calzada.

Se puede definir que la adherencia es una propiedad que tiene relación directa con la necesidad de movilizar las fuerzas de fricción entre las llantas y el pavimento, en otras palabras es la resistencia que se produce en la superficie de contacto de dos cuerpos cuando se intenta que uno se deslice sobre otro.

Esta fricción se relaciona con la superficie de rodado o textura del pavimento, que es una propiedad física definida como la geometría más fina del perfil longitudinal de la carretera, su acabado determinará el coeficiente de fricción y en consecuencia la capacidad de adherencia que se tenga.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ante la poca disponibilidad de equipos reconocidos para la determinación del coeficiente de fricción, el Departamento de Construcción del concesionario Proyectos de Infraestructura S.A. (PISA) en conjunto con el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, aunaron esfuerzos para la creación del Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF), que será útil para la evaluación de la superficie de rodadura de una vía.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Determinar el coeficiente de fricción en zonas establecidas dentro de la Universidad del Valle y en tramos de vías localizados en el norte del Valle. Usando para tal fin el Equipo implementado para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF).

3.2 ESPECIFICOS

- Medir el coeficiente de fricción en zonas establecidas utilizando el Equipo para Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF).
- Hacer una descripción detallada del instrumento de medida creado para dicho fin.
- Realizar ensayos tanto en carpetas de rodadura nuevas como en antiguas en zonas establecidas en la doble calzada de la vía Buga-Tuluá-La Paila. Hacer un análisis de resultados y finalmente una comparación para ver el estado de la vía.

4. JUSTIFICACIÓN

Disponer de una superficie que garantice una buena adherencia entre el neumático y la calzada es un tema de gran importancia a nivel internacional. En Colombia se encuentra limitado por la poca disponibilidad, ya que algunas de las más reconocidas universidades, concesionarios viales y corporaciones como Corasfaltos no cuentan en sus laboratorios de suelos y pavimentos con equipos que permitan medir la fricción o la textura de un pavimento, esta falta de equipos lleva a la creación de dispositivos que suplan esta necesidad.

Una investigación con el equipo creado para la determinación del coeficiente de fricción, una descripción detallada de la metodología de uso y un análisis de los resultados obtenidos en un tramo específico, son de gran importancia ya que indican el estado físico en que se encuentran las carreteras en cuanto a adherencia, calidad de la capa de rodadura y servicialidad, que son usadas diariamente por cientos de usuarios.

5. ANTECEDENTES

Se han efectuado diferentes investigaciones y trabajos relacionados con la resistencia al deslizamiento, coeficiente de fricción y textura de los pavimentos, parámetros con los que se evalúan las características superficiales de estos, en diferentes países, incluyendo Colombia; en donde el objetivo final es proporcionar al usuario seguridad y confort. Algunos de los países que cuentan con valores mínimos recomendados de macrotextura y fricción donde se haya utilizado concreto asfáltico en caliente son: Argentina, Chile, Cuba, España, Estados Unidos, Inglaterra.

En Suramérica en países como Chile se ha estudiado la resistencia al deslizamiento utilizando el equipo Péndulo de Fricción, aunque el laboratorio nacional de vialidad ha realizado evaluaciones con equipos de alto rendimiento desde 1999, como el equipo Mu Meter, el cual permite determinar la fuerza de fricción lateral y el equipo SCRIM. En Argentina se han realizado congresos de Actualización de las Metodologías de Medición y Programas de Adquisición de Datos en los Equipos de la Vialidad Nacional. En donde los trabajos realizados permiten la comparación con patrones internacionales como IRI (Índice de Rugosidad Internacional) e IFI (Índice de Fricción Internacional). En Perú también se han realizado estudios de Resistencia al Deslizamiento en Pavimentos Flexibles por medio de una propuesta de norma peruana en el año 2004.

En nuestro país se han entregado boletines de seguridad vial, en donde la adherencia neumático-calzada cobra protagonismo siendo el causante en gran proporción de accidentes ocurridos, pero no se mencionan pruebas realizadas para determinar el coeficiente de fricción. Aunque en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) se encuentra una guía para la determinación de la textura superficial de un pavimento mediante el Método del Circulo de Arena (I.N.V.E-791), para la determinación del Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento con el Péndulo del TRRL

(I.N.V.E- 792) y para la determinación de la Fuerza de Fricción Lateral Sobre Superficies Pavimentadas Mu-Meter (I.N.V.E-794), son pocas las instituciones que cuentan con estos equipos.

6. CONCEPTOS GENERALES DE LOS PAVIMENTOS

6.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS

Un pavimento es el conjunto de capas de materiales seleccionados, colocadas entre la cota de subrasante y la superficie de rodamiento o cota de rasante, que recibe de forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes:

- Anchura.
- Trazado horizontal y vertical.
- Resistencia adecuada a las cargas para evitar fallas funcionales y estructurales.
- Adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento en condiciones húmedas.
- Presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua.
- Tener una adecuada visibilidad.
- Señalización y seguridad.

Ya que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, dichos materiales comúnmente se encuentran en la naturaleza, por consecuencia resultan económicos.

Para todo diseño de pavimentos se deben tener un estudio del tránsito y cargas, un estudio de suelos de la zona del proyecto, un estudio de los materiales de la región, un estudio de las condiciones climáticas de la región y el método o métodos de diseño apropiados.

6.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

En nuestro medio los pavimentos se clasifican en:¹

- pavimentos flexibles.
- pavimentos rígidos.
- pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles.
- pavimentos articulados.

6.2.1 Pavimentos flexibles

Este tipo de pavimento está compuesto de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base (ver Imagen 1.), la totalidad de la estructura interviene en la distribución de las cargas. Resulta más económico en construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento frecuente para cumplir con su vida útil.

1. Montejo Fonseca, Alfonso” Ingeniería de Pavimentos para Carreteras”

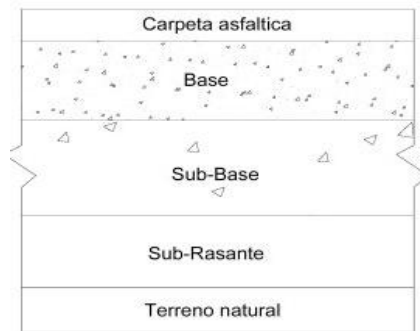


Imagen 1. Estructura pavimento flexible

6.2.2 Pavimentos rígidos

Se compone de losas de concreto hidráulico (ver Imagen 2.) que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años, el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa comúnmente en las juntas de las losas. Las cargas son absorbidas por la losa de hormigón y las capas inferiores deben servir de apoyo. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de esfuerzos se produce en una zona muy amplia.

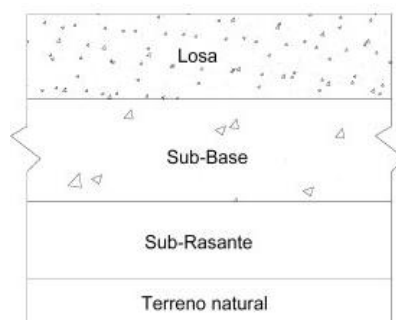


Imagen 2. Estructura pavimento rígido

6.2.3 Pavimentos semi-rígidos

Este tipo de pavimento guarda básicamente la misma estructura de un pavimento flexible, una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. El empleo de estos aditivos tiene la finalidad básica de corregir y modificar las propiedades de los materiales locales que no son aptos para la construcción de las capas del pavimento, teniendo en cuenta que los adecuados se encuentran a distancias tales que encarecerían notablemente los costos de construcción.¹

6.2.4 Pavimentos articulados

Los pavimentos articulados están compuestos por una capa de rodadura que está elaborada con bloques prefabricados, llamados adoquines, de espesor uniforme e iguales entre sí. Esta puede ir sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de la calidad de esta y de la magnitud y frecuencia de las cargas que circulan por dicho pavimento¹.

Se emplean fundamentalmente en zonas urbanas, portuarias, industriales, etc., tanto para tráfico ligero (peatonal incluso) como para el más pesado que pueda existir. Aparte de las posibilidades estéticas que ofrecen los adoquines con sus formas y colores, el poder montar y desmontar el pavimento es una ventaja cuando existe una alta probabilidad de que se produzcan asentamientos importantes, haya que abrir zanjas para instalar o reparar servicios o bien se trate de un pavimento temporal².

1. Montejo Fonseca, Alfonso "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras"

2. Kraemer, Carlos. "Ingeniería de Carreteras"



Imagen 3. Estructura pavimento articulado

6.3 MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS

Es evidente que la calidad de los materiales que conforman una obra vial, es determinante para la selección de la estructura del pavimento más adecuada técnica y económicamente. Por una parte, se consideran los agregados disponibles en depósitos aluviales y canteras del área. Además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, hay que atender a las cantidades disponibles, al suministro y al precio, condicionado en gran medida por la distancia de transporte. Por otro lado, se consideran los materiales básicos de mayor costo como son los ligantes y conglomerantes, principalmente; finalmente se considera la calidad de las mezclas de los materiales pétreos y cementantes¹.

Es importante mencionar y describir las principales fuentes y los diferentes materiales empleados como bases y sub-bases, y la influencia que tienen en el comportamiento de los pavimentos. Como materiales básicos utilizados en las diversas capas del pavimento se emplean los siguientes²:

1. Montejo Fonseca, Alfonso "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras"

2. Kraemer, Carlos. "Ingeniería de Carreteras"

- Suelos granulares de calidad suficiente.
- Áridos o agregados naturales rodados o triturados total o parcialmente; áridos artificiales, subproductos industriales y desechos de diverso tipo.
- Ligantes hidrocarburos: betunes asfálticos, emulsiones bituminosas, betunes modificados con polímeros, betunes fluidificados, y betunes fluxados; conglomerantes hidráulicos y puzolánicos: cementos, escorias granuladas, cenizas volantes, etc.; cales aéreas.
- Agua
- Material varios, como barras de acero, aireantes y plastificantes en hormigones, activantes en mezclas bituminosas, etc.

6.3.1 Procedencia de materiales

6.3.1.1 Áridos o agregados

Los áridos naturales, derivados de una u otra forma de la disgregación de las rocas, son los materiales tradicionales en la construcción de carreteras. Se extraen en yacimientos (areneros, gravas, etc.) de origen fluvial o marino y en canteras abiertas en formaciones rocosas. Tanto los unos como los otros pueden tener carácter permanente o explotarse solo, para una obra determinada. La forma de explotación tiene una importancia decisiva para obtener un árido correcto.²

Hay otros áridos que se obtienen directamente en unos procesos industriales específicos, a veces a partir de materiales naturales. Con ellos se pretende conseguir unas características especiales para la capa de rodadura, como ocurre con los tres tipos de áridos artificiales de mayor uso: las arcillas expandidas, la sílice calcinada y la bauxita calcinada.

2. Kraemer, Carlos. "Ingeniería de Carreteras"

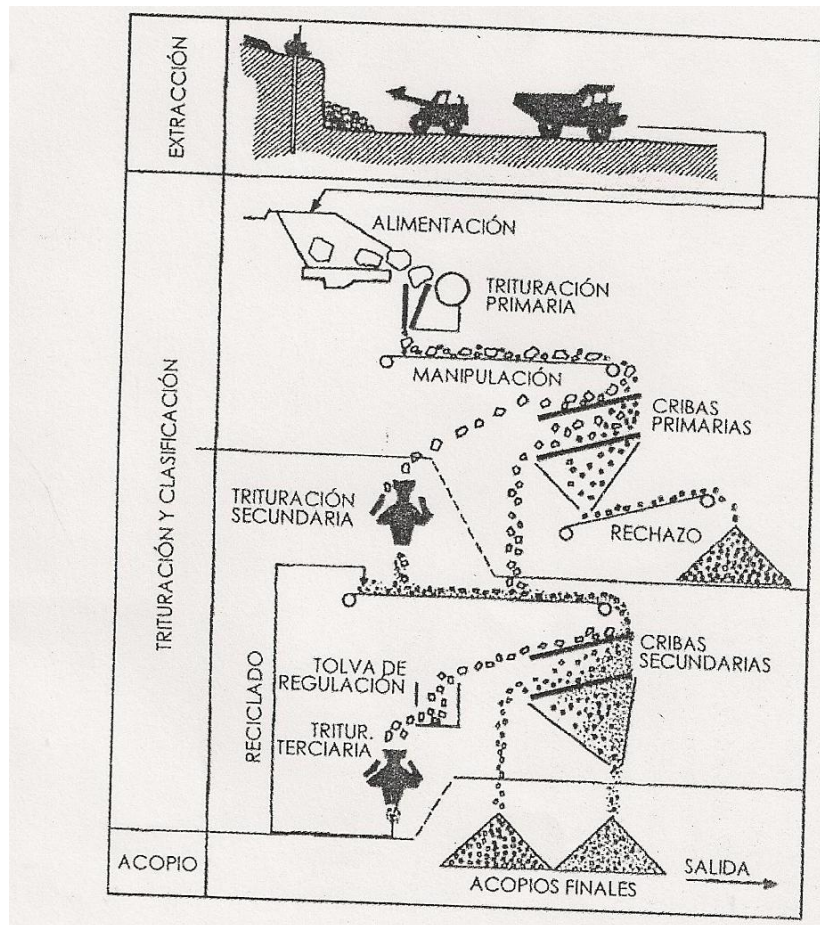


Imagen 4. Proceso de extracción de los áridos

6.3.1.2 Ligantes

Actualmente en carreteras se usa el asfalto, que puede ser de origen natural (rocas o lagos asfálticos) o artificial el cual es un producto de la refinación del petróleo crudo. Dadas sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, tiene gran variedad de aplicaciones en la construcción de pavimentos flexibles como por ejemplo, mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, emulsiones asfálticas, riegos de liga, entre otros.

6.3.2 Propiedades fundamentales de los materiales

6.3.2.1 Propiedades de los suelos para su clasificación

6.3.2.1.1 Granulometría

La granulometría es quizá la propiedad más característica de un suelo, se distinguen según los tamaños de las partículas: grava, gravilla, arcillas, limos, etc. La facilidad de la medida de esta propiedad hace que sea la más empleada en la clasificación de suelos.

6.3.2.1.2 Plasticidad

La plasticidad es la posibilidad que presenta un suelo de ser moldeado sin fractura. Se debe al comportamiento de los minerales que componen las arcillas; en esencia, la plasticidad es posible porque esos minerales y el agua que contienen están cargados eléctricamente y estas cargas hacen que la estructura se mantenga con grandes deformaciones.

La cuantificación de la plasticidad se realiza mediante los límites de consistencia de Atterberg, miden la plasticidad del suelo a través de las humedades que son necesarias para alcanzar los estados límites de consistencia. Es importante saber que la estructura del pavimento no debe tener plasticidad.

6.3.2.1.3 Otras propiedades

Las propiedades que dependen del estado natural del suelo en el emplazamiento donde se encuentra proporcionan una información que puede ser útil. Esas propiedades son:

- Contenido en sales y yesos: determinan el comportamiento de los suelos y de los hormigones que están en contacto con ellos. De particular importancia el contenido de sulfatos y carbonatos, el contenido de yesos y el contenido de sales solubles, que se determinan normalmente en la fracción de suelo de tamaño inferior a 2 mm.
- Humedad natural: es el contenido de agua del suelo in situ, útil para determinar si es necesario algún cambio en este contenido previamente al tratamiento que se prevea.
- Densidad aparente: influye en la capacidad de soporte de un suelo en estado natural.
- Contenido de materia orgánica: influye en el comportamiento a largo plazo de un suelo en cuanto a posibles variaciones de volumen y asentamientos secundarios.

6.3.2.2 Propiedades de los áridos para su caracterización

6.3.2.2.1 Granulometría de los áridos

Es una característica fundamental de cualquier conjunto compactado de partículas, pues influye de forma importante en su resistencia mecánica, y consiste en hacer pasar las partículas del agregado a través de tamices.

2.Kraemer, Carlos."Ingeniería de Carreteras"

6.3.2.2.2 Rozamiento interno y cohesión

La resistencia a la deformación, y por tanto la capacidad de soporte de una capa de firme, depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, eventualmente, de la cohesión que le proporcione el ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta si las partículas son angulosas (árido triturado) y de la textura superficial áspera. También influyen de forma importante la granulometría del árido y la proporción de huecos en el material compactado. A unas mayores densidades corresponden generalmente unas mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor muy importante².

La cohesión debe confiarse exclusivamente al ligante o conglomerante, y no a los finos. La cohesión entre las partículas de un árido suele ser despreciable; si existe, se debe a la plasticidad de la fracción fina, y en general, es más nociva que útil².

6.3.2.2.3 Propiedades específicas del árido grueso

El árido grueso está constituido por las fracciones de un tamaño apreciable. Se trata, por lo tanto, de partículas individualizables con una cierta facilidad. De ellas interesan unas propiedades como su forma, su resistencia al desgaste, etc. De las cuales las más importantes se comentan con un cierto detalle a continuación:

2.Kraemer, Carlos."Ingeniería de Carreteras"

- **Forma y angulosidad**

La forma de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente a la resistencia del esqueleto mineral del árido. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en redondeadas, cúbicas, lajas y agujas².

La presencia de partículas alargadas o planas puede afectar la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad de las mezclas de concreto asfáltico, porque tienden a orientarse en un solo plano, lo cual dificulta la manejabilidad; además debajo de las partículas se forman vacíos con aire por la acumulación de agua bajo estas durante el mezclado perjudicando las propiedades de la mezcla endurecida¹.

Además de la forma de las partículas del árido grueso, se debe tener en cuenta su angulosidad, que influye (junto con la textura superficial de las partículas) en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno².

- **Resistencia a la fragmentación**

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una capa de firme (pavimento) tanto durante su construcción como después de ponerla en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio. Los más usuales son el ensayo de la máquina de Los Ángeles².

1. Montejo Fonseca, Alfonso "Ingeniería de Pavimentos para Carreteras"

2. Kraemer, Carlos. "Ingeniería de Carreteras"

- **Limpieza y adhesividad**

Es fundamental que los áridos estén limpios cualquiera que sea la aplicación que se les vaya a dar. La falta de limpieza es el mayor problema en muchos casos debido a deficiencias en los procesos de trituración, a contaminantes de los acopios por suelos en los que se apoyan o a la dificultad de lavar los áridos.

Entre los fenómenos físicos y químicos que se producen en la superficie de los áridos tiene especial importancia la adhesividad con los ligantes hidrocarbonados. Es un fenómeno complejo en el cual intervienen factores físicos: suciedad del árido, textura y porosidad, viscosidad y tensión superficial del ligante, espesor de la película de ligante, etc. Y químicos: relativos a la naturaleza del ligante y del árido².

- **Pulimiento**

La resistencia al pulimiento de las partículas de un árido, es decir, la resistencia a perder la aspereza de su textura superficial, tiene gran importancia desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento si dichas partículas van a ser empleadas en las capas de rodadura de naturaleza bituminosa o en determinados acabados de los pavimentos de hormigón².

2.Kraemer, Carlos."Ingeniería de Carreteras"

6.3.2.3 Características generales y clasificación de los ligantes

Los ligantes hidrocarbonados son aglomerantes constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos. Tiene carácter termoplástico que hace que su consistencia dependa de la temperatura. Dentro de los ligantes tenemos los betunes asfálticos, betunes fluidificados o fluxados, emulsiones bituminosas y ligante modificados. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

- Los betunes asfálticos suelen obtenerse como subproductos de la destilación en las refinerías de petróleo. Es un sistema coloidal de tipo gel que a temperatura ambiente es sólido o semisólido, con lo cual requiere un calentamiento previo.
- Los betunes fluidificados o fluxados son unos derivados de los betunes asfálticos que se obtienen mediante su disolución en un aceite o fluidificante, teniendo por lo tanto una viscosidad reducida².
- Las emulsiones bituminosas son dispersiones coloidales de betún asfáltico en agua. Son productos líquidos a temperatura ambiente no necesita ningún calentamiento.
- Los ligantes modificados son aquellos resultados de la innovación en los materiales que componen el firme. Estos ligantes se han generado tanto de los betunes como de las emulsiones bituminosas, a los que se les han incorporado aditivos que modifican sus propiedades.

Los betunes asfálticos son el tipo de ligantes más usado en la construcción de carreteras.

6.3.2.4 Tipos de mezclas bituminosas

Se denomina mezcla bituminosa a la constituida por un ligante que, en película continua, envuelve todas y cada una de las partículas minerales de un árido, con cualquier granulometría. Las mezclas bituminosas son actualmente un material usado muy ampliamente en la construcción de pavimentos flexibles de calidad. Con ellas se consiguen superficies de rodadura de gran regularidad geométrica, cómodas por lo tanto para los vehículos, y adecuadas para velocidades altas³.

Existe una clasificación tradicional de las mezclas bituminosas estas son: mezclas bituminosas en frío y mezclas bituminosas en caliente. A continuación se da una breve descripción de cada uno de ellos.

- Se define como mezcla bituminosa en frío la combinación de áridos y un ligante bituminoso en la que no es preciso calentar previamente los áridos. Además su puesta en obra se realiza a temperatura ambiente, por lo que desaparecen los problemas de transporte a largas distancias.
- El termino mezcla bituminosa en caliente define los materiales resultantes de la combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, fabricados y puestos en obra a una temperatura superior a la ambiente.

3. J.A. Fernández del Campo "Pavimentos Bituminosos"

6.3.2.5 Propiedades generales de las mezclas bituminosas

Las principales propiedades de las mezclas bituminosas son las siguientes:

- **Estabilidad**

Es la capacidad de las mezclas bituminosas de soportar carga y resistir las tensiones a las que se ve sometida, con unos valores de deformación tolerables. Es una representación empírica de la resistencia del material, combinación del rozamiento interno y la cohesión.

- **Resistencia a las deformaciones plásticas**

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que mas preocupa del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente.

Las deformaciones plásticas se caracterizan principalmente por una sección transversal e la superficie que ya no ocupa su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas. Para esto se necesita que la mezcla este elaborada con un cemento asfáltico consistente, lo mas próximo posible a un sólido elástico también a temperaturas relativamente altas.

- **Resistencia a la fatiga**

El paso repetido de las cargas, de un valor inferior al de rotura, va produciendo un agotamiento progresivo por fatiga del material, en las condiciones en las que la mezcla tiene un comportamiento elástico, esto es, en condiciones de bajas temperaturas y de elevadas velocidades. El aumento de las deflexiones puede conducir a agrietamientos generalizados, lo que se conoce como piel de cocodrilo.

La determinación de la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa se lleva a cabo en laboratorio sometiendo las probetas a ensayos de cargas repetidas.

- **Durabilidad**

Las capas de rodadura no sólo se ven sometidas a la acción de las cargas del tráfico, sino que también deben soportar agresiones externas de diversa índole como la radiación solar, la acción oxidante del aire y del agua, el derrame de aceites y combustibles, etc. Todas estas agresiones externas afectan a la durabilidad de la mezcla.

El fenómeno del envejecimiento de las mezclas bituminosas es complejo, por la diversidad de sus causas y por la complejidad de los procesos fisicoquímicos que se desencadenan, y se manifiesta por microfisuras, pérdidas de mortero, migraciones de ligante, desenvuelta del árido grueso, etc. Apareciendo de esta forma deterioros diversos.

En cualquier caso, la duración de una capa de rodadura correctamente proyectada y construida debería ser de 10 años o más, aunque a menudo esa duración se reduce sustancialmente, debido sobre todo a los bajos contenidos de ligante empleados.

- **Resistencia al deslizamiento**

La resistencia al deslizamiento de las mezclas utilizadas en capas de rodadura debe ser adecuada y mantenerse durante suficientes años. Para que esto ocurra, si se trata de carreteras con tráfico intenso y rápido, que el árido grueso empleado tenga un alto coeficiente de pulido acelerado y que la macrotextura de la mezcla puesta en obra sea suficientemente rugosa, aunque intentando que no sea demasiado ruidosa.

- **Impermeabilidad**

Las capas superiores del firme deben proteger a las capas inferiores del firme y la explanada de la acción del agua. Por este motivo, las mezclas bituminosas empleadas en las capas superiores deben estar dotadas de una elevada impermeabilidad. Si se utilizan mezclas drenantes en la capa de rodadura, la impermeabilidad se le deberá dar a la capa inmediatamente inferior.

6.4 ESTRUCTURA Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA DOBLE CALZADA LA PAILA – ZARZAL

La estructura utilizada en la vía nueva localizada en el sector Garcero cuenta con las siguientes capas cada uno con un espesor determinado:

ESTRUCTURA	ESPESOR (cm)
Común	Variable
Estructural	50
Sub-base	25
Base	30
Carpeta	1 ^{ra} capa
	Rodadura
	9
	6

Tabla 1. Estructura y espesores utilizados en la doble calzada

El material proviene de la planta de producción localizada en la vereda La Leonera del municipio de La Victoria, siendo extraídos los agregados del río Bugalagrande.

- **Características mezcla bituminosa**

Tipo de mezcla: Carpeta compuesta de dos capas una tipo S20 espesor de 9cm y una tipo S12 con espesor de 6cm para rodadura.

Tipo de Ligante: Emulsión de rompimiento rápido, CRR-1 (Catiónica de rompimiento rápido)

Categoría de tráfico de Diseño: Tráfico pesado

Porcentaje de Ligante: 200 a 300 gramos de asfalto residual por m².

La mezcla asfáltica S20 es una de las más utilizadas en las carreteras españolas, es una mezcla semidensa que es utilizada para capas intermedias.

El tipo de mezclas bituminosas utilizadas cumplen con los requerimientos impuestos para mezclas G, S y D en artículo 542, “Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso” del PG-3 aprobado por la Orden Circular 24/2008 de la Dirección General de Carreteras-secretaría general de infraestructura de España. En la cual la letra indica el tipo de granulometría corresponden entonces a una mezcla: Densa (D), semidensa (S) o gruesa (G)

A continuación se muestra una lista de requerimientos generales de las mezclas bituminosas de la norma europea empleadas en España.

REQUERIMIENTOS GENERALES	CARACTERÍSTICAS	NORMA EUROPEA
	Granulometría.	EN 12697-2
	Contenido en huecos.	EN 12697-8
	Sensibilidad al agua.	EN 12697-12
	Resistencia al fuego.	EN 13501-1
	Resistencia al fuel (aeropuertos).	EN 12697-43
	Resistencia a fluidos de deshielo.	
	Resistencia a la abrasión.	EN 12697-16
	Resistencia a la deformación permanente.	EN 12697-22
	Temperatura de la mezcla.	EN 12697-13

Tabla 2. Requerimientos generales mezclas bituminosas

- **Tipo de ligante hidrocarbonado**

Según norma española tipo de ligante hidrocarbonado a emplear, que será seleccionado en función de la capa a que se destine la mezcla bituminosa en caliente y de la categoría de tráfico, entre los que se indican en la siguiente tabla:

ZONA TERMICA ESTIVAL	CATEGORIA DE TRAFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2	T3 y arcenes	T4
CALIDA	B40/50 BM-2 BM-3c	B40/50 B60/70 BM-2 BM-3b BM-3c	B40/50 B60/70 BM-3b		B60/70	B60/70 B80/100
MEDIA	B40/50 B60/70 BM-3b BM-3c	B60/70 BM-3b			B60/70 B80/100	
TEMPLADA	B40/50 B60/70 BM-3b BM-3c	B60/70 B80/100 BM-3b				

Tabla 3. Tipo de ligante a emplear en capa de rodadura y siguiente, Fuente artículo 542 (O.M.

FOM/891/04)

ZONA TERMICA ESTIVAL	CATEGORIA DE TRAFICO PESADO			
	T00	T0	T1	T2
CALIDA	B40/50 B60/70 BM-2		B40/50 B60/70	B60/70
MEDIA				B60/70 B80/100
TEMPLADA	B40/50 B60/70 B80/100			B80/100

Tabla 4. Tipo de ligante a emplear en capa de base bajo otras dos, Fuente articulo 542 (O.M. FOM/891/04)

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos, deberá estar comprendida dentro de alguno de los rangos fijados en la siguiente tabla:

TIPO DE MEZCLA		ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)										
		40	25	20	12,5	8	4	2	0,500	0,250	0,125	0,063
Densa	D12	-	-	100	80-95	64-79	44-59	31-46	16-27	11-20	6-12	4-8
	D20	-	100	80-95	65-80	55-70						
Semidensa	S12	-	-	100	80-95	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	5-10	3-7
	S20	-	100	80-95	64-79	50-66						
	S25	100	80-95	73-88	59-74	48-63						
Gruesa	G20	-	100	75-95	55-75	40-60	25-42	18-32	7-18	4-12	3-8	2-5
	G25	100	75-95	65-85	47-67	35-54						
Drenante	PA12	-	-	100	70-100	38-62	13-27	9-20	5-12	-	-	3-6

Tabla 5. Rangos granulométricos % acumulado, Fuente: articulo 542 Ministerio de fomento España.

El tipo de mezcla bituminosa en caliente a emplear en función del tipo y del espesor de la capa de firme, se definirá según la siguiente tabla:

TIPO DE CAPA	ESPESOR (cm)	TIPO DE MEZCLA
RODADURA	4-5	D-12; S-12; PA-12
	>5	D20; S20
INTERMEDIA	5-10	D20; S20; S25
BASE	7-15	S25; G20; G25; MAM(**)
ARCENES (*)	4-6	D12

Tabla 6. Tipos de mezclas y espesor de las capas, Fuente: artículo 542 Ministerio de fomento España.

(*) En el caso que no se emplee el mismo tipo de mezcla que en la capa de rodadura de la calzada.

(**) Espesor máximo de 13 cm. MAM (Mezcla de Alto Modulo)

- **Especificaciones de la unidad terminada.**

En cuanto a la Regularidad Superficial, la norma española establece los siguientes límites:

PORCENTAJE DE HECTOMETROS	TIPO DE CAPA		
	RODADURA E INTERMEDIA		OTRAS CAPAS BITUMINOSAS
	TIPO DE VIA		
	CALZADAS DE AUTOPISTAS Y AUTOVIAS	RESTO DE VIAS	
50	< 1,5	< 1,5	< 2,0
80	< 1,8	< 2,0	< 2,5
100	< 2,0	< 2,5	< 3,0

Tabla 7. Índice de Regularidad Internacional (IRI) (dm/mm) para firmes de nueva construcción.

De igual forma para la macrotextura superficial y resistencia al deslizamiento, donde se especifica que la capa deberá presentar una textura homogénea, uniforme y exenta de segregaciones. Y según la NLT- 336 no deberán ser inferiores a los valores indicados en la siguiente tabla:

CARACTERISTICA	TIPO DE MEZCLA	
	DRENANTE	RESTO
MACROTEXTURA SUPERFICIAL (*) Valor mínimo (mm)	1,5	0,7
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (**) CRT mínimo (%)	60	65

Tabla 8. Macrotextura superficial (NLT-335) y Resistencia al deslizamiento (NLT-336) de las mezclas para capas de rodadura.

(*) Medida antes de la puesta en servicio de la mezcla

(**) Medida una vez transcurridos dos meses de la puesta en servicio de la capa.

En cuanto a normas colombianas para mezclas densas en caliente (MDC) el instituto nacional de vías (INVIAS) en el artículo 450-02 habla de la elaboración, transporte, colocación y compactación de una o más capas de mezcla asfáltica de este tipo. El conjunto de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral deberá ajustarse a alguna de las siguientes gradaciones:

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA			
Normal	Alternativo	MDC-0	MDC-1	MDC-2	MDC-3
25.0 mm	1"	100	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-100	80-100	100	-
12.5 mm	1/2"	65-80	67-85	80-100	-
9.5 mm	3/8"	55-70	60-77	70-88	100
4.75 mm	No.4	40-55	43-59	49-65	65-87
2.00 mm	No.10	24-38	29-45	29-45	43-61
425 mm	No.40	9-20	14-25	14-25	16-29
180 mm	No.80	6-12	8-17	8-17	9-19
75 mm	No.200	3-7	4-8	4-8	5-10

Tabla 9. Rangos granulométricos de los agregados – INVIAS Artículo 450-02

Descripción de la Emulsión Catiónica de rompimiento rápido, CRR-1

TIPO DE EMULSIONES ENSAYOS	NORMA REF INV	ROMPIMIENTO RAPIDO				ROMPIMIENTO MEDIO		ROMPIMIENTO LENTO								FRECUENCIA DE ENSAYO
		MPI CRR-1		MPI CRR-2		MPI CRM		MPI CRL-1/1E		MPI CRL-1h		MPI CRL-0				
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX			
		ENSAYOS SOBRE LA EMULSION														
VISCOSIDAD - Saybolt Furol 25°C (s) - Saybolt Furol 50°C (s)	E-763	--	--	--	--	--	--	--	200	--	100	--	50	POR COCHADA		
ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO - Sedimentación a los 7 días (%)	E-764	--	5	--	5	--	5	--	5	--	5	--	10	POR COCHADA		
DESTILACION - Contenido de asfalto residual (%) - Contenido de disolventes (%)	E-762	60	--	65	--	60	--	57	--	57	--	40	--	POR COCHADA		
TAMIZADO - Retenido en tamiz nº 20, 850µm (%)	E-765	--	0,1	--	0,1	--	0,1	--	0,1	--	0,1	--	0,1	POR COCHADA		
ROTURA - Mezcla con cemento (%)	E-770	--	--	--	--	--	--	--	--	2	--	--	--	POR COCHADA		
CARGA PARTICULA	E-767	POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		POSITIVA		SEMESTRAL		
pH	E-768	--	6	--	6	--	6	--	6	--	6	--	6	COCHADA		
RECUBRIMIENTO DEL AGREGADO Y RESISTENCIA AL DESPLAZAMIENTO - Con agregado seco - Con agregado seco y acción del agua - Con agregado húmedo - Con agregado húmedo y acción del agua	E-769	--	--	--	--	BUENA		--	--	--	--	--	--	COCHADA		
		--	--	--	--	SATISFACTORIA		--	--	--	--	--	--			
		--	--	--	--	SATISFACTORIA		--	--	--	--	--	--			
		--	--	--	--	SATISFACTORIA		--	--	--	--	--	--			
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE LA DESTILACION																
PENETRACION @ 25°C, 100gr, 5s (0,1mm)	E-706	60	100	60	100	100	250	60	100	60	100	200	300	POR COCHADA		
DUCTILIDAD @ 25°C, 5cm/min (cm)	E-702	40	--	40	--	40	--	40	--	40	--	40	--	SEMESTRAL		
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	E-713	97	--	97	--	97	--	97	--	97	--	97	--	SEMESTRAL		

Tabla 10. Especificaciones ligante CRR-1

6.5 EVALUACIÓN DEL ESTADO SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO

Existen diferentes factores que alteran la estructura de un pavimento y que afectan la seguridad, la comodidad y velocidad de circulación del tránsito vehicular. Es por esto que cobra importancia el mantenimiento de un pavimento para corregir los defectos encontrados y alcanzar un grado de transitabilidad adecuado durante un largo periodo de tiempo que justifique la inversión.

Estos defectos son generados por diferentes causas de distinto origen y naturaleza. Se pueden mencionar los siguientes¹ :

1. MONTEJO FONSECA, ALFONSO" INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS"

- Elevado incremento de las cargas circulantes y de su frecuencia con respecto a las previstas en el diseño original.
- Deficiencias durante el proceso constructivo en la calidad real de los materiales en espesores o en las operaciones de construcción, particularmente en la densificación de las capas.
- Diseños deficientes.
- Factores climáticos regionales desfavorables.
- Deficiente mantenimiento por escasez de recursos económicos disponibles, maquinaria especializada y personal capacitado.
- Problemas de aprovisionamiento en algunas zonas del país.
- Mal control de calidad en la construcción.

6.5.1 Tipos de fallas en los pavimentos flexibles

Las fallas en los pavimentos pueden ser de dos tipos.¹

- Fallas superficiales: comprende los defectos de la superficie de rodamiento debido a fallas de la capa asfáltica y no guardan relación con la estructura de la calzada. La corrección de estas fallas se efectúa con solo regularizar la superficie y conferirle la necesaria impermeabilidad y rugosidad. Ellos se logra con capas asfálticas delgadas que poco aportan desde el punto de vista estructural en forma directa.

1. Montejo Fonseca, Alfonso” Ingeniería de Pavimentos para Carreteras”

- Fallas estructurales: comprende los defectos de la superficie de rodamiento cuyo origen es una falla en la estructura del pavimento, es decir de una o más de las capas constitutivas que deben resistir el complejo juego de sollicitaciones que impone el tránsito y el conjunto de factores climáticos regionales. En la corrección de este tipo de fallas es necesario un refuerzo sobre el pavimento existente para que el paquete estructural responda a las exigencias del tránsito presente y futuro estimado.

A continuación se muestra un resumen de las fallas que se presentan en los pavimentos flexibles.

Clasificación general de los deterioros de los pavimentos asfálticos			
Clase	Tipo de deterioro	Causado originalmente por el tránsito	Causado originalmente por los materiales o el clima
Agrietamientos	Agrietamiento por fatiga (grietas longitudinales y piel de cocodrilo)	X	
	Agrietamiento en bloque		X
	Agrietamiento de borde		X
	Agrietamiento longitudinal (no de fatiga)		X
	Agrietamiento transversal		X
	Grietas parabólicas		X
Deformaciones	Ahuellamiento	X	
	Abultamientos		X
	Depresiones (Baches)		X
	Desplazamientos de borde		X
	deterioro de parches	X	
	Expansiones		X
Desprendimiento	Separación entre calzada y berma		X
	Pulimiento de los agregados	X	
	Ojos de pescado	X	
	Descascaramiento		X
	Pérdida de película ligante		X
	Pérdida de agregado		X
Afloramientos	Exudación		X
	Afloramiento de aguas		X
	Afloramiento de finos		X
otras Categorías	Desintegración de los bordes del pavimento	X	
	Escalonamiento entre calzada y berma		X
	Erosión de las bermas		X

Tabla 11. Deterioros pavimentos flexibles Fuente (Ingeniería de pavimentos, Montejó Fonseca Alfonso)

De igual forma se muestra un resumen con las fallas en los pavimentos rígidos.

Fallas en pavimentos rígidos		
Clase	Tipo de falla	Descripción
Deformaciones	Variación del nivel de las losas	Una o más de las losas han perdido su nivel original.
Desprendimientos	Desintegración	Agrietamiento superficial del concreto con pequeñas roturas.
Fisuras y Grietas	Cuero de caimán	Agrietamiento del pavimento en diversas direcciones y asemejando el cuero del caimán.
	Longitudinales	Grietas más o menos paralelas al eje del pavimento. En ocasiones tienden a ser parabólicas.
	Transversales	Grietas perpendiculares al eje del pavimento.
	De esquina	Grietas que afectan la esquina de una losa formando un triángulo.
	Voladura	Grieta transversal de una junta y levantamiento de una losa con desprendimiento de material.

Tabla 12. Fallas pavimento rígido Fuente (Ingeniería de pavimentos, Montejo Fonseca Alfonso)

7. COEFICIENTE DE FRICCIÓN

7.1 ¿QUE ES EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN?

Siempre que un objeto se mueve sobre una superficie hay una resistencia al movimiento debido a la interacción del objeto con sus alrededores, dicha resistencia recibe el nombre de fuerza de fricción.

Tales fuerzas de fricción son importantes en la vida cotidiana, están presentes al caminar, al escribir, al frenar un vehículo y en todos los movimientos que realizamos, y siempre se opone a la dirección del desplazamiento. La fricción desgasta, disminuye el movimiento y calienta la materia, pero sin fricción no se podría vivir normalmente y sería peligroso; es por eso que el hombre ha encontrado varias formas de reducir la fricción mediante el uso de aceites, lubricantes etc. Claro está dicha fuerza se puede aumentar o disminuir cuando sea conveniente.

7.2 ¿DE QUE DEPENDE EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN?

La fuerza de fricción no depende del tamaño de la superficie de contacto entre los dos cuerpos, pero si depende de cuál sea la naturaleza de la superficie de contacto, de los materiales que la formen y si es más o menos rugosa.

7.3 TIPOS DE FUERZAS DE FRICCIÓN

Existen dos clases de fuerzas de fricción: estática y dinámica.

- La fuerza de fricción estática es la reacción que presenta un cuerpo en reposo oponiéndose a su deslizamiento sobre otra superficie.
- La fuerza de fricción dinámica tiene un valor igual a la que se requiere aplicar para que un cuerpo se deslice a una velocidad constante sobre otro.

La fuerza de fricción estática será un poco mayor que la fricción dinámica, ya que se requiere aplicar más fuerza para lograr que un cuerpo inicie su movimiento, que la necesaria para que lo conserve después a una velocidad constante.

7.4 MODELO DE FUERZAS ACTUANTES (DCL)

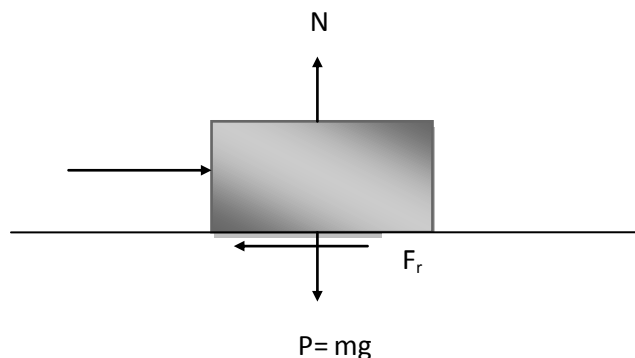


Imagen 5. Modelo de fuerzas actuantes

F : Fuerza aplicada.

F_r : Fuerza de rozamiento entre la superficie de apoyo y el cuerpo.

N : Fuerza normal

P : Peso propio del cuerpo, igual a la masa por la aceleración de la gravedad.

7.5 LEYES DEL ROZAMIENTO

La fuerza de rozamiento entre dos cuerpos se debe a que la superficie de contacto nunca es perfectamente lisa, sino que presenta unas pequeñas rugosidades imperceptibles a simple vista, rugosidades que, al acoplarse unas con otras, ofrecen una resistencia al movimiento. Las principales leyes del rozamiento son:

- La fuerza de rozamiento es siempre de sentido contrario a la fuerza que empuja al cuerpo.
- El valor de la fuerza de rozamiento es siempre menor o, a lo sumo, igual que el de la fuerza que empuja al cuerpo.
- La fuerza de rozamiento es prácticamente independiente de la superficie de contacto.
- La fuerza de rozamiento depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto, así como del estado en que se encuentren sus superficies.
- La fuerza de rozamiento es directamente proporcional a la fuerza normal (perpendicular) que actúa entre las superficies en contacto.
- Para un mismo par de cuerpos, el rozamiento es mayor en el momento del arranque que cuando se ha iniciado el movimiento.
- La fuerza de rozamiento es prácticamente independiente de la velocidad con que se desliza un cuerpo sobre el otro.

7.6 FRICCIÓN EN PAVIMENTOS

Una estructura de pavimento tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática y durante un periodo de tiempo prolongado.

Una de las principales características que debe cumplir un pavimento, se refiere a disponer de una superficie de rodamiento que asegure una buena adherencia con los neumáticos en todo instante aun cuando el pavimento se encuentra mojado, lo cual es fundamental para la seguridad de los usuarios de cualquier vía. Un parámetro importante en la adherencia es el coeficiente de fricción, esta adherencia entre el neumático y el pavimento va disminuyendo en el tiempo por efecto del pulimiento causado por el tránsito, llegando a constituirse en un importante indicador del comportamiento del pavimento.

Este coeficiente se puede cuantificar físicamente mediante un factor que resulta de la relación entre la fuerza necesaria para desplazar el peso estándar del equipo utilizado en un recorrido de longitud establecido y la normal conocida. Debido a la importancia del agua en esta propiedad del pavimento el método ha optado por realizar los ensayos en condiciones de pavimento mojado.

7.7 FACTORES QUE AFECTAN LA ADHERENCIA EN UN PAVIMENTO

Es importante mencionar que la adherencia no depende únicamente del pavimento, sino también de las características del tránsito y del clima. Los factores más importantes que afectan la adherencia entre el neumático y la calzada de un pavimento son las siguientes⁴:

- La superficie del pavimento, como la condición geométrica, naturaleza del árido, la cantidad de asfalto, la textura superficial, la presencia de agua en la carpeta, o incluso la presencia de contaminantes (polvo, caucho) entre otros.
- En el tránsito, como la velocidad del vehículo, clasificación de la vía y del peso de los vehículos y los neumáticos.
- En el clima con su variación de temperatura.

A continuación se muestra un resumen con cada uno de los factores según: superficie, tránsito y clima.

Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento – Clima	
Factores	Descripción
Clima	Con respecto a los neumáticos, como el caucho es un material visco-elástico, esta elasticidad está afectada por la temperatura, por lo que la fricción entre los neumáticos y el pavimento estará influenciada por ella. Por otro lado, estudios realizados han determinado que existe muy poca influencia de la temperatura y la fricción del propio pavimento.

Tabla 13. Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento – Clima
Fuente (Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Norma peruana 2004)

4. De Solminihaç, Echaveguuren, 2003

Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento - Superficie del pavimento	
Factores	Descripción
Condición geométrica	La fricción esta distribuida en sentido longitudinal y transversal. Se debe tener cuidado con la adherencia en muchos puntos del pavimento
Naturaleza del árido	El desgaste y pulimiento afectan directamente a la adherencia N-P y se debe a la naturaleza y forma del árido. La película de asfalto se adhiere mejor a superficies rugosas. Las gravas naturales como las de río, tienen textura lisa y tienen baja resistencia al pulido mientras que las gravas trituradas poseen una textura superficial rugosa. La resistencia al desgaste de un agregado depende de la rigidez, debiendo estar constituida por materiales de cierta dureza
Cantidad de asfalto	El exceso de asfalto disminuirá el roce entre el neumático y el pavimento al ocasionar exudación del mismo
Textura superficial	Es una característica de la superficie de rodado formada por áridos y asfalto en unión. Según la Asociación mundial de la carretera AIPCR (1995) la textura se clasifica en: Megatextura: es la que corresponde a la mayor longitud de onda. Se encuentra más cercana a la rugosidad. Los baches son un ejemplo de megatextura elevada. Macrotextura: es la textura superficial del propio pavimento. Conjunto de partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie. Permite evacuar el agua de la superficie. Se dice que para que un pavimento ofrezca suficiente adherencia a cualquier velocidad se debe tener una macrotextura gruesa. Microtextura: textura superficial de los agregados pétreos. Una forma directa de medirla es mediante el coeficiente de fricción. Esta directamente asociada con la resistencia al deslizamiento. Se dice que para que un pavimento ofrezca suficiente adherencia a cualquier velocidad se debe tener una microtextura áspera.
Presencia de agua en el pavimento	Cuando el pavimento se encuentra seco, la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento es mucho mayor que cuando una superficie tiene presencia de agua.
Presencia de contaminantes	La presencia de mucho polvo tierra hará que la porosidad que presenta el pavimento se termine, por lo que la adherencia N-P se verá disminuida, al igual que la presencia del caucho en el pavimento.

Tabla 14. Factores que afectan la adherencia N-P, Fuente (Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Norma peruana 2004)

Según la AIPCR la textura superficial se clasifica en Megatextura, Macrotextura y Microtextura, que dependen de la longitud de onda.

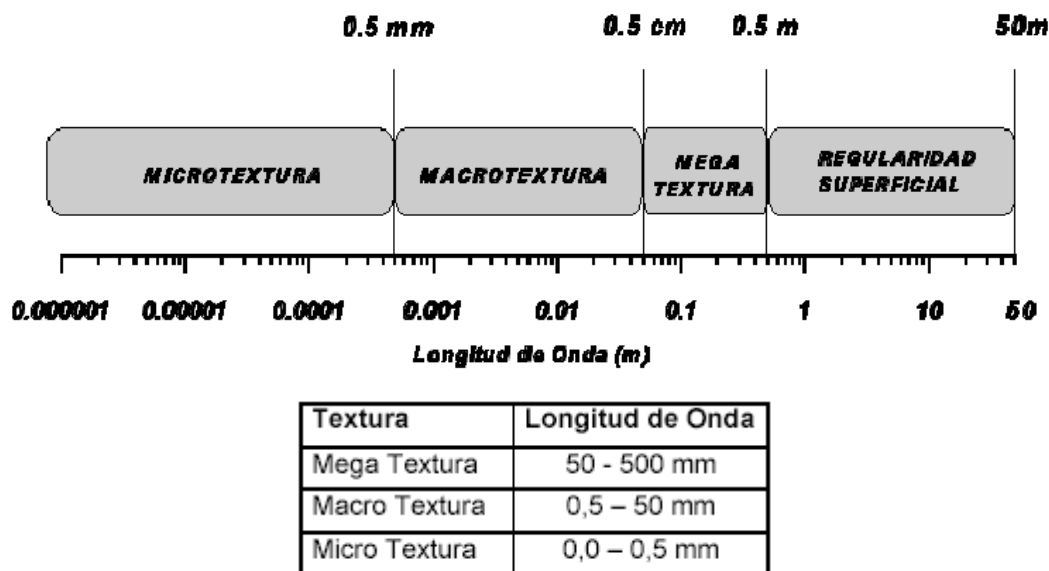


Imagen 6. Clasificación de la textura superficial según AIPCR Fuente: (Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Norma peruana 2004).

Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento – Transito	
Factores	Descripción
Transito	A medida que la velocidad aumenta existe la tendencia a una disminución del rozamiento debido a que disminuye el área de contacto entre el neumático y el pavimento.
Clasificación de la vía y peso del vehículo	Esto está relacionado con la categoría de la vía. El tipo y volumen que circule por la vía influirá en el desgaste del pavimento. Mientras mayor sea la carga, mayor será el desgaste del pavimento y por ende, las características adecuadas para una textura superficial correcta, disminuirán.
Neumáticos	Los neumáticos de un automóvil, y el aire que los llena constituyen el único contacto con el pavimento. Siendo la presión de inflado un factor muy influyente ya que la fricción entre la superficie del neumático y la superficie disminuirá si el neumático posee una gran presión de inflado ya que habrá una menor área de contacto.

Tabla 15. Factores que afectan a la adherencia del neumático al pavimento – Transito Fuente (Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Norma peruana 2004).

7.8 EVALUACIÓN DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE UN PAVIMENTO

Una superficie de rodadura deslizante es el factor que más influye en el número de accidentes de tráfico en un tramo de carretera. Evidentemente una mala textura del pavimento no afecta directamente el fallo de la sección estructural, pero influye decisivamente en la seguridad del usuario. Existen muchos equipos destinados a determinar la resistencia de los pavimentos al deslizamiento. Entre ellos caben destacar dos tipos: los ensayos puntuales y los equipos de medida continua¹.

- **Ensayos puntuales**

Los ensayos puntuales son los que se pueden realizar en un determinado punto de la carretera y no requiere de vehículos para su implementación. El más conocido es el ensayo con péndulo portátil (British Pendulum Tester TRRL) método desarrollado por el Transport and Road Research Laboratory, presenta ventajas por su simplicidad, bajo costo y facilidad de transporte.

Otro ensayo puntual es el llamado “mancha de arena” que mide la profundidad media de las pequeñas depresiones superficiales del pavimento. Este ensayo se ha considerado como más representativo de la resistencia al deslizamiento a altas velocidades, debido a que en estas condiciones las fuerzas de roce pasan a depender fundamentalmente de la macrotextura del pavimento.

1. Montejo Fonseca, Alfonso” Ingeniería de Pavimentos para Carreteras”



Péndulo TRRL



Parche de arena

Imagen 7. Ensayos puntuales (fuente: www.aepo.es)

- **Ensayos de medida continua**

Los ensayos de medida continua se realizan con equipos en movimiento y tienen la ventaja de que las medidas generadas representan mejor lo que ocurre con los vehículos circulando.

Dentro de este grupo uno de los más conocidos es el denominado SCRIM (Sideway Coefficient Routine Investigation Machine). Otro equipo de gran difusión es el Mu Meter el cual mide directamente la resistencia al deslizamiento.



Imagen 8. Ensayos de medida continua GRIPTESTER (fuente: www.aepo.es)



Imagen 9. Ensayos de medida continua SCRIM (fuente: www.aepo.es)

A continuación se muestran un resumen de los equipos o ensayos utilizados para determinar las diferentes variables físicas en un pavimento.

Indicadores de Textura y Fricción					
Variable Física		Indicador/Índice	Descripción	Equipos/Ensayos	Unidades
Fricción	Longitudinal	Coeficiente de Fricción Longitudinal	Estima la fuerza de arrastre necesaria para realizar una maniobra de frenado en recta	Griptester, trailer ASTM	Adimensional
	Transversal	Coeficiente de Fricción Transversal	Estima la fuerza de fricción en curvas o para realizar maniobras a lo largo de una recta	MuMeter, Scrim	Adimensional
Textura	Microtextura	Péndulo Portátil	Estima la fuerza de fricción longitudinal y transversal	Péndulo DIVA, Péndulo TRL	Mm
	Macrotextura	Profundidad Media de Textura	Estima la profundidad equivalente de la textura respecto de una superficie de área conocida	Círculo de arena, Marco portátil, Video Láser RST	Mm
Integrados		Índice de Fricción Internacional (IFI)	Integra la textura y la fricción con una ecuación de referencia		

Tabla 16. Indicadores de Textura y Fricción Fuente revista Universidad EAFIT No 127, Índice de Seguridad Vial Sep-Oct de 2001

7.8.1 MEDICIÓN DE LA TEXTURA POR MEDIO DE LA PRUEBA DEL CÍRCULO DE ARENA

7.8.1.1 Descripción de la prueba del círculo de arena

Este método de prueba (Imagen 7.) es adecuado para pruebas de campo. 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.

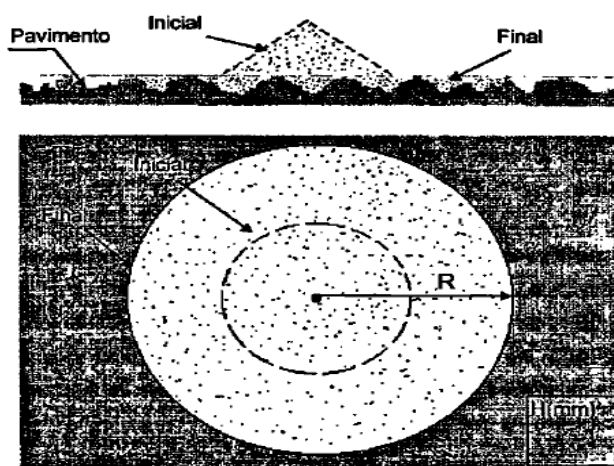


Imagen 10. Esquema de ensayo del círculo de arena

Las mediciones del espesor de las texturas producidas 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 concuerdan 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 agregados sueltos que se pudieran remover o desplazar durante condiciones ambientales y de servicio normales.

7.8.1.2 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 mm³), 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 una 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 sea igual tanto en masa como en volumen.

7.8.1.3 Procedimiento

Los materiales y método de prueba estándar constan de una cantidad de material uniforme, un recipiente de volumen conocido, una pantalla adecuada para protección contra el viento, brochas para limpiar la superficie, un disco plano para dispersar al material sobre la superficie y una regla o cualquier otro dispositivo para determinar el área cubierta por el material. Se recomienda también una balanza de laboratorio para asegurarse de la consistencia de las mediciones de cada ensayo.

El procedimiento de prueba involucra la dispersión de un volumen conocido de material sobre una superficie de pavimento limpia y seca, la medición de dicha área cubierta, y subsecuentemente se calcula el promedio del espesor entre la parte inferior de los vacíos y la parte superior de los agregados. Esta medición del espesor de la textura superficial refleja las características de la macrotextura.

En la dispersión del material especificado en este método, la superficie de los vacíos está completamente llena hasta los picos de las partículas circundantes.

Este método de prueba no se considera conveniente para utilizarse en superficies estriados o pavimentos con vacíos grandes (≥ 1.0 plg (25mm)).

- **Superficie de prueba:** Inspeccione la superficie del pavimento que va a ser evaluada y seleccione un área seca y homogénea que no contenga características únicas o localizadas tales como grietas y juntas.

Debe estar completamente limpia utilizando primeramente la brocha de alambre y posteriormente la brocha de cerdas suaves para remover cualquier residuo, escombros o partículas de agregado sueltas de la superficie. Colocar la pantalla contra viento alrededor de la superficie por ensayar.

- **Material de prueba:** Llene el volumen de material conocido con material seco, golpee suavemente la base del cilindro varias veces sobre una superficie rígida.

Llene con material hasta la parte superior del cilindro y nivele con una regleta. Si se dispone de una balanza, determine la masa del material en el cilindro y utilice esta misma masa de material de prueba en cada determinación.

- **Medición del ensayo:** Vierta el volumen del material en la superficie limpia dentro del área protegida por la pantalla contra viento. Disperse cuidadosamente el material en el parche circular con la herramienta de disco, con la parte cubierta con hule hacia abajo, llenando los vacíos superficiales hasta los picos de las partículas de agregados, también puede realizarse con

una regleta. Mida y registre el diámetro del área cubierta por el material como mínimo de cuatro localizaciones igualmente espaciadas alrededor de la circunferencia de la muestra. Calcule y registre el diámetro promedio.

- **Número de mediciones de prueba:** El mismo operador deberá desarrollar al menos cuatro mediciones del espesor de la macrotextura, espaciadas aleatoriamente sobre un tipo de superficie de pavimento ensayado. El promedio aritmético de los valores de espesor de la macrotextura se deben considerar como el promedio del espesor de la macrotextura de la superficie del pavimento bajo estudio.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es aplicable a cualquier tipo de pavimento.	Se trata de un ensayo lento que requiere dos personas y cortar el tráfico si se realiza en carretera abierta
	Difícil garantizar la homogeneidad de la arena que se utiliza lo que puede producir errores de apreciación del valor de textura.

Tabla 17. Ventajas y desventajas ensayo del círculo de arena

7.8.2 MEDICIÓN DE LA FRICCIÓN POR MEDIO DEL PÉNDULO INGLÉS

7.8.2.1 Descripción

El procedimiento tiene por objeto obtener un Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (C. R .D) que, manteniendo una correlación con el coeficiente físico de rozamiento, valore las características antideslizantes de la superficie de un pavimento midiendo la microtextura de este. Los resultados obtenidos mediante este ensayo no son necesariamente proporcionales o correlativos con medidas de rozamiento hechas con otros equipos o procedimientos.



Imagen 11. Péndulo de fricción británico (ASTM E 274)

Este ensayo consiste en medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas provisto en su extremo de una zapata de goma, cuando la arista de la zapata roza, con una presión determinada, sobre la superficie a ensayar y en una longitud fija. Esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo.

El método de ensaye se puede emplear también para medidas en pavimentos de edificaciones industriales, ensayos de laboratorio sobre probetas, baldosas o cualquier tipo de muestra de superficies planas terminadas.

7.8.2.2 Equipo

Se utiliza el péndulo británico (Imagen 8.) o también conocido como Péndulo del TRRL (Transport and Road Research Laboratory), una regleta graduada, termómetro, recipientes para agua, cepillo, cinta métrica.

7.8.2.3 Procedimiento de ensayo

- Preparación del aparato

a) Nivelación: Nivelar el instrumento exactamente (con precisión) girando los tornillos niveladores hasta que la burbuja este centrada en el ojo la burbuja niveladora.

b) Ajuste a ceros: Se eleva la cabeza del aparato, de tal forma que el brazo del péndulo oscile sin rozar la superficie a medir y se procede a comprobar el cero de la escala de medida. Para ello se lleva el brazo del péndulo a su posición horizontal hacia la derecha del aparato, quedando enganchado automáticamente en el mecanismo de disparo. Después se desplaza la aguja indicadora hasta el tope situado en la cabeza del aparato, de forma que quede paralela al eje del brazo del péndulo. Este tope, constituido por un tornillo, permite corregir el paralelismo entre la aguja y el brazo. Seguidamente, por presión sobre el pulsador se dispara el brazo del péndulo, que arrastrará la aguja indicadora solamente en su oscilación hacia delante. Se denota la lectura señalada por la aguja de la escala del panel y se vuelve el brazo a su posición inicial de disparo. La correlación de la lectura del cero se realiza mediante el ajuste de los anillos de fricción. Si la aguja sobre pasa el cero de la escala, la corrección exigirá apretar los anillos de fricción. Si la aguja no alcanza el cero de la escala, la corrección exigirá aflojar los anillos de fricción.

c) Ajuste de la longitud de deslizamiento: Con el péndulo colgando libre colocar el espaciado abajo del tornillo de ajuste o regulación del brazo del péndulo. Bajar el brazo del péndulo de manera que la superficie de la goma apenas toque la superficie. Bloquear la cabeza del péndulo firmemente, levantar el brazo del péndulo, y remover el espaciador. Colocar el calibrador al lado y paralelo a la dirección del balanceo para verificar la longitud de la trayectoria de contacto.

Elevar el brazo del péndulo, entonces suavemente bajar hasta la superficie de deslizamiento otra vez se apoye o descansa en la superficie. Si la longitud de la trayectoria de contacto no está entre 124 y 127 mm ($4 \frac{7}{8}$ y 5.0 pulgadas) en superficies de prueba planos o entre 75 y 78 mm ($2 \frac{15}{16}$ y $3 \frac{1}{16}$ de

pulgada) en superficies curvas del ensaye medidos con la zapata de goma, se puede corregir ajustando la elevación del péndulo o bajar el instrumento con los tornillos niveladores frontales.

7.8.2.4 Cálculo

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

$$c.d.r = \frac{\text{lectura efectiva}}{100}$$

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 (Imagen 9.) a la lectura efectiva a 20°. 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.

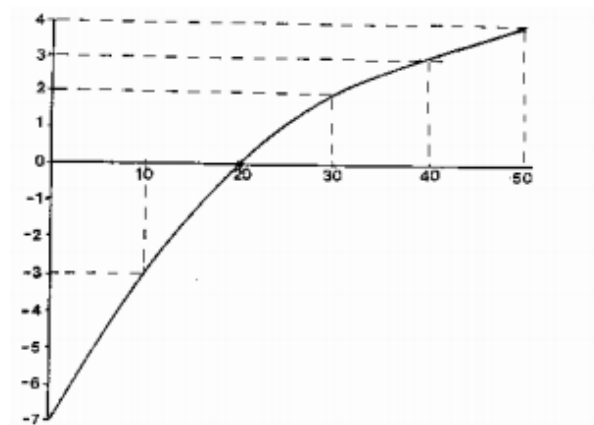


Imagen 12. Factor de corrección por temperatura péndulo inglés

7.8.2.5 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:

Fricción, Valor de CDR, Adimensional	Calificación
< 0.5	Malo (derrapamiento del vehículo)
0.51 – 0.6	De regular a bueno
0.61 – 0.8	Bueno
0.81 – 0.9	De bueno a regular
> 0.91	Malo (desgaste de neumáticos)

Tabla 18. Criterio para evaluar los valores de fricción en la superficie de pavimento

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es aplicable a cualquier tipo de pavimento.	No es muy utilizado para determinar el estado de una red de carretera ya que presenta limitaciones de uso por su lentitud, por interferir en el tránsito y por su pequeña representatividad espacial.
Da una indicación indirecta del grado de rugosidad que proporciona la microtextura del pavimento.	

Tabla 19. Ventajas y desventajas ensayo péndulo inglés

7.8.3 PERFILÓMETRO LASER

La determinación del perfil a la escala de la macroestructura suele hacerse con los perfilómetros láser, que emite un rayo sobre un punto del pavimento mediante un receptor, situado en ángulo respecto al láser, determinan la altura de dicho punto. El láser puede ir instalado en equipos estacionarios sobre una viga por la que se desliza el emisor o montado en un vehículo que se desliza a velocidad de hasta 70km/hr, con el objeto de automatizar las mediciones y no interferir con el flujo vehicular, principalmente en autopistas.

7.8.4 EL SIDEWAY COEFFICIENT ROUTINE INVENTORY MACHINE “SCRIM”

Para medir directamente la fricción, se tiende cada vez mas a utilizar equipos acoplados a un vehículo o remolcado. Entre estos existen diferentes tipos, según las características de la rueda de medida:

- Rueda oblicua (respecto al sentido de la marcha).
- Rueda bloqueada.
- Rueda parcialmente bloqueada, con grado de deslizamiento fijo.
- Rueda parcialmente bloqueada, con grado de deslizamiento variable.

Los equipos de rueda oblicua determinan el coeficiente de rozamiento transversal. Uno de los equipos más utilizado de este tipo es el SCRIM (Sideway Coefficient Routine Inventory Machine). La velocidad relativa de la rueda de estos equipos respecto al pavimento es proporcional a la velocidad del vehículo, multiplicada por el seno del ángulo de deriva, 20° en el caso del SCRIM.

Los equipos de rueda bloqueada pueden medir el coeficiente de rozamiento a gran velocidad, pero no sirven para la auscultación continua de los pavimentos de la red, pues el neumático de ensayo se desgasta muy rápidamente y, por ello se reserva para ensayos puntuales, como por ejemplo, en los pavimentos de aeropuertos.

Los equipos de rueda parcialmente bloqueada suelen operar con un deslizamiento comprendido entre el 10% y el 20%. Estos equipos son sensibles principalmente a la microestructura.

Otro aspecto por el que se diferencian los equipos de medida de la fricción es por el tipo de neumático de la rueda de medida (diagonal o radial; estriado o con dibujos).

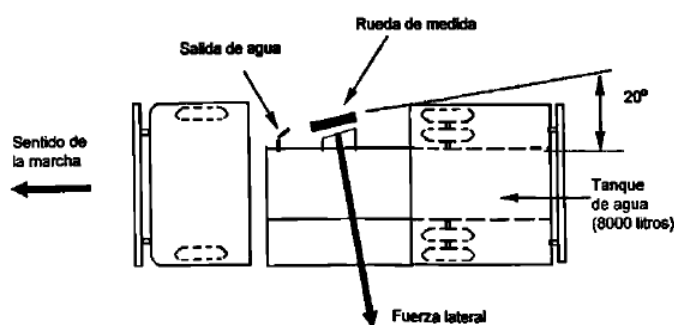


Imagen 13. Esquema del equipo SCRIM Fuente: Consideraciones para la aplicación del índice de fricción internacional en carreteras de México, López V, Diana

7.8.5 EL MU - METER

El Mu-meter es utilizado principalmente en aeropuertos, para determinar el coeficiente de fricción de las pistas, las zonas de rodaje y las plataformas, tanto en pavimentos secos como en pavimentos húmedos.

Los coeficientes obtenidos con los diversos procedimientos y equipos de medida de la resistencia al deslizamiento presentan diferencias, incluso con aparatos del mismo tipo, debido a las numerosas variables que intervienen. Un

factor importante es la velocidad a que se realiza la medida, ya que prácticamente no puede interpretarse el coeficiente de resistencia al deslizamiento sin conocer la velocidad. Sin embargo, existe una correlación de cada equipo entre lo que mide y el estado del pavimento.

7.8.6 MEDIDA DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL DE UN PAVIMENTO MEDIANTE LA REGLA DE TRES METROS

El ensayo permite determinar las irregularidades superficiales de una capa del pavimento, siguiendo una línea o perfil longitudinal, en general paralela al eje de la vía, aunque puede adoptarse cualquier otra dirección.

Los valores y resultados obtenidos representan una característica de la regularidad determinada con el aparato y no son necesariamente proporcionales o similares a los determinados con otros equipos o procedimientos.

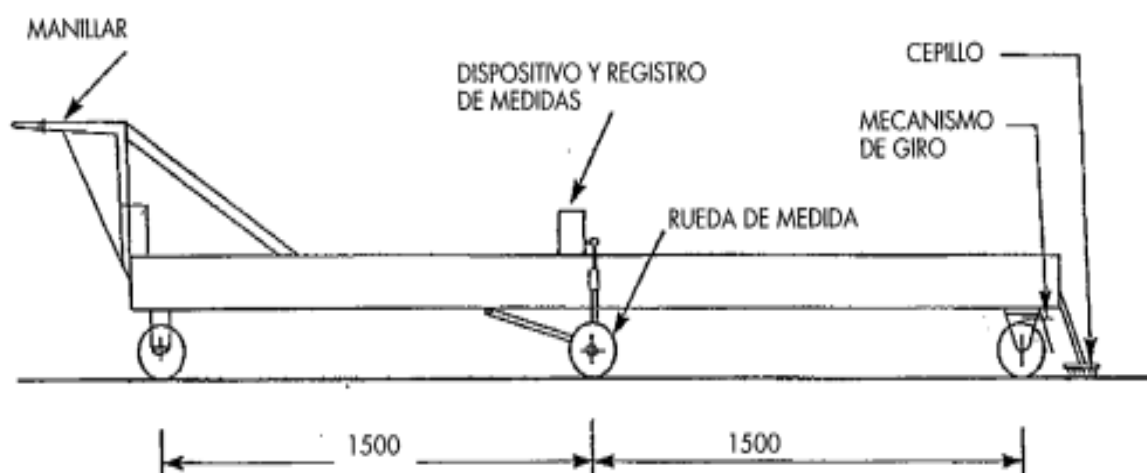


Imagen 14. Medida de la irregularidad superficial mediante la regla de tres metros, estática o rodante. NLT-334/98

7.9 VALORES MINIMOS NORMAS INTERNACIONALES

- **Argentina**

Macrotextura:

Se consideran pavimentos especiales desde el punto de vista de la adherencia a las profundidades de textura por encima de 0,50mm medidas con el Círculo de la Arena.

Coeficiente de fricción:

Según el Pliego de Concesiones Viales para calzadas en servicio, está indicado que el coeficiente medido con el Mu Meter debe ser mayor o igual a 0,40.

- **Chile**

Tipo de Sitio	Coef. de Roce
1 Rotondas 2 Curvas con radios menores a 150 [m] 3 Pendientes 1/20 o mayores y pendientes de largos mayores a 100[m] 4 Aproximaciones a cruces semaforizados en vías no restringidas	0.55
Vías interurbanas de categoría autopista primaria y colectora. Vías urbanas con tráfico con flujos mayores que 2000 veh/día.	0.5
Todas las demás vías	0.4

Tabla 20. Coeficiente de fricción en Chile medido con el equipo SCRIM, según el tipo de sitio

- **Cuba**

Macrotextura:

Valor mínimo de 0,33 mm medido con el Ensayo del Marco Portátil de Textura.

Coeficiente de fricción:

Valor mínimo de 0,33 para pavimentos flexibles medidos con el Péndulo Portátil DIVA (CFD).

- **España**

Macrotextura:

En el artículo 543 de mezclas bituminosas en caliente O.C. 299/89T se indica: “Únicamente a efectos de recepción de capas de rodadura la textura superficial según la Norma NLT-335/87 (Círculo de Arena) no deberá ser inferior a 0,7mm”.

Coeficiente de fricción:

Los valores medidos por el equipo SCRIM para un pavimento nuevo va de 0,70 – 0,80.

- **Estados Unidos**

Coeficiente de Fricción:

Se fijó el valor mínimo de 0.47 medido con el péndulo TRRL.

- **Inglaterra**

Coeficiente de Fricción:

Se recomendó un valor mínimo de 0.45 para todos los estados, utilizando el Péndulo Portátil TRRL

7.10 PROCEDIMIENTOS RECONOCIDOS POR INVIAS

El Instituto Nacional de Vías dentro de Las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras (tomo III), en el capítulo de Ensayos Sobre las Características Superficiales y Estructurales de Pavimentos, hace una descripción del procedimiento de ensayo para los diferentes equipos ya sea para medir fricción o textura de un pavimento. A continuación se muestran los ensayos con su norma correspondiente:

ENSAYO	NORMAL	ALTERNA
Textura Superficial de un Pavimento Mediante el Método del Círculo de Arena	I.N.V.E - 791	
Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento con el Péndulo del TRRL	I.N.V.E - 792	BS 812, ASTM E-793, NLT 334
Medida de la Regularidad Superficial Mediante la Regla de los Tres Metros	I.N.V.E - 793	NLT 334
Fuerza de Fricción Lateral Sobre Superficies Pavimentadas (Mu-Meter)	I.N.V.E - 794	ASTM E-670

Tabla 21. Ensayos reconocidos normas INVIAS

De igual forma se contactaron los laboratorios de suelos de las universidades más importantes del país para tener conocimiento de equipos disponibles para determinar el coeficiente de fricción, las universidades contactadas fueron:

- Universidad de los Andes (Bogotá)
- Universidad del Cauca (Popayán)
- Universidad Javeriana (Cali-Bobota)
- Universidad Nacional (Bogotá)
- Universidad Eafit (Medellín)
- Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga)
- Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector Transporte e Industrial (Corasfaltos)

De todas las instituciones contactadas la Universidad del Cauca es la única que posee un equipo para la medición de la textura (Péndulo TRRL).

8. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO IMPLEMENTADO PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

En la siguiente figura se visualiza el equipo como tal y las partes que lo componen para lograr la determinación del coeficiente de fricción entre el neumático y la calzada de un pavimento.

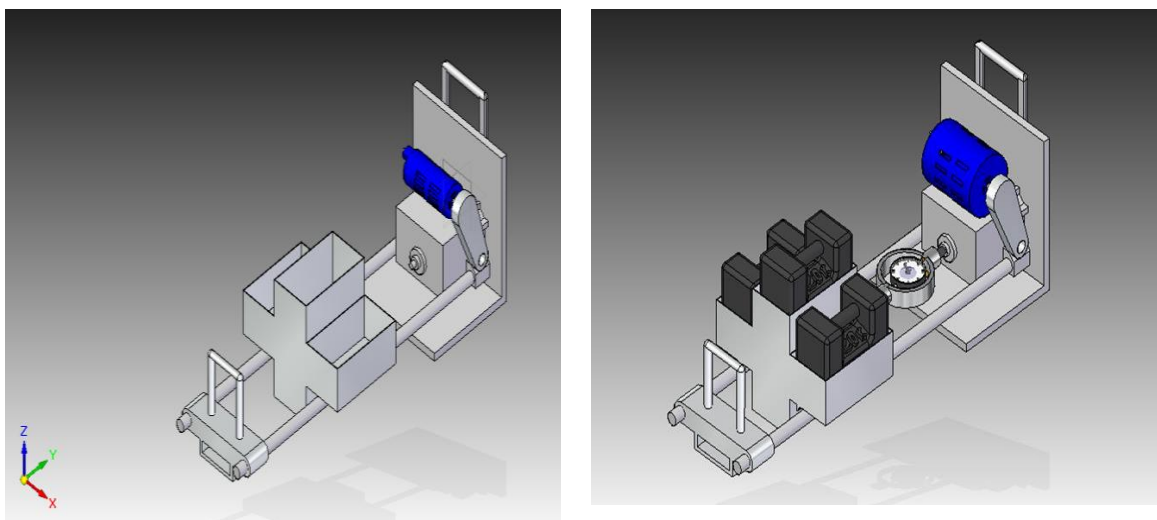


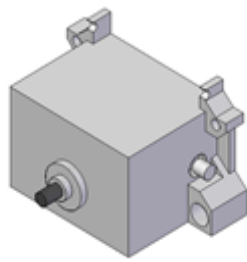
Imagen 15. Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF)

El equipo está compuesto por la unión de diferentes piezas mecánicas las cuales conforman el cuerpo del equipo, un motor es el encargado de mover un tornillo que soportar un anillo de carga y una base de neopreno ubicado en la parte inferior de la cajuela del equipo encargada de soportar 100 Kg que serán arrastrados a través de una superficie de pavimento.

Para el correcto funcionamiento y lectura de los datos recogidos durante los ensayos, el equipo necesita recurrir a piezas adicionales como un anillo de carga y cinco pesas de 20 Kg cada una, las cuales serán arrastradas por el anillo de carga durante una distancia de por lo menos 1 in, adicionalmente se requiere una pieza en madera que sirve de apoyo al equipo y que será

estabilizada por un vehículo, para reducir las vibraciones producidas por el equipo y así obtener una lectura estable.

A continuación se muestran por separado los diferentes componentes del equipo:



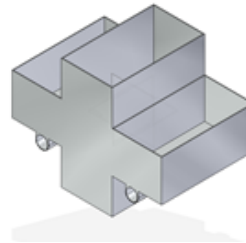
Caja contenedora del tornillo.



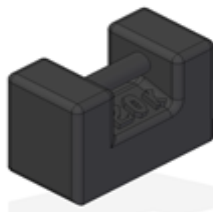
Motor.



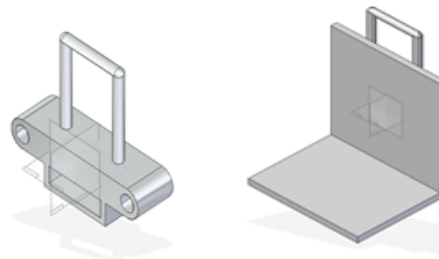
Anillo de carga.



Caja contenedora de pesas.

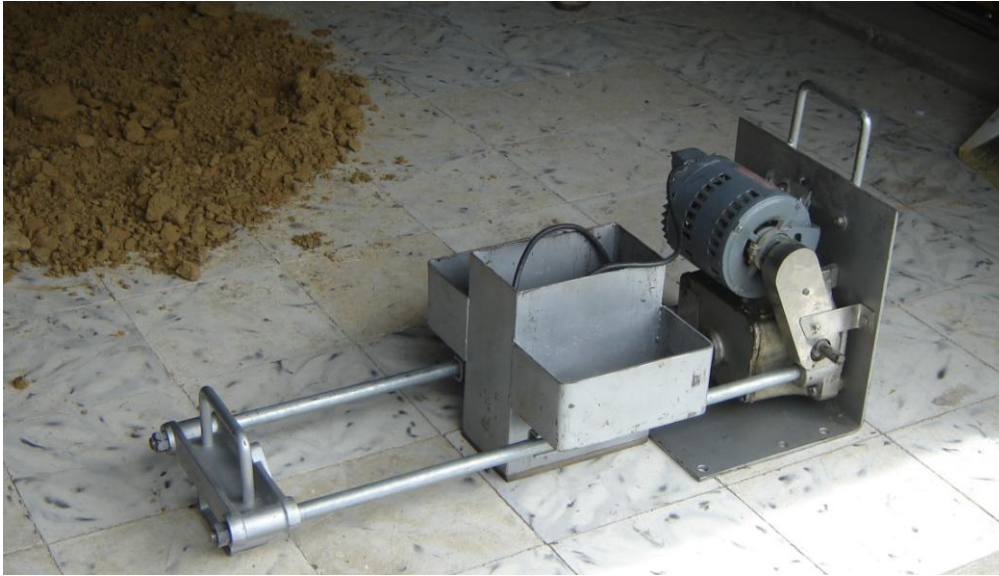


Pesas de 20 kg.

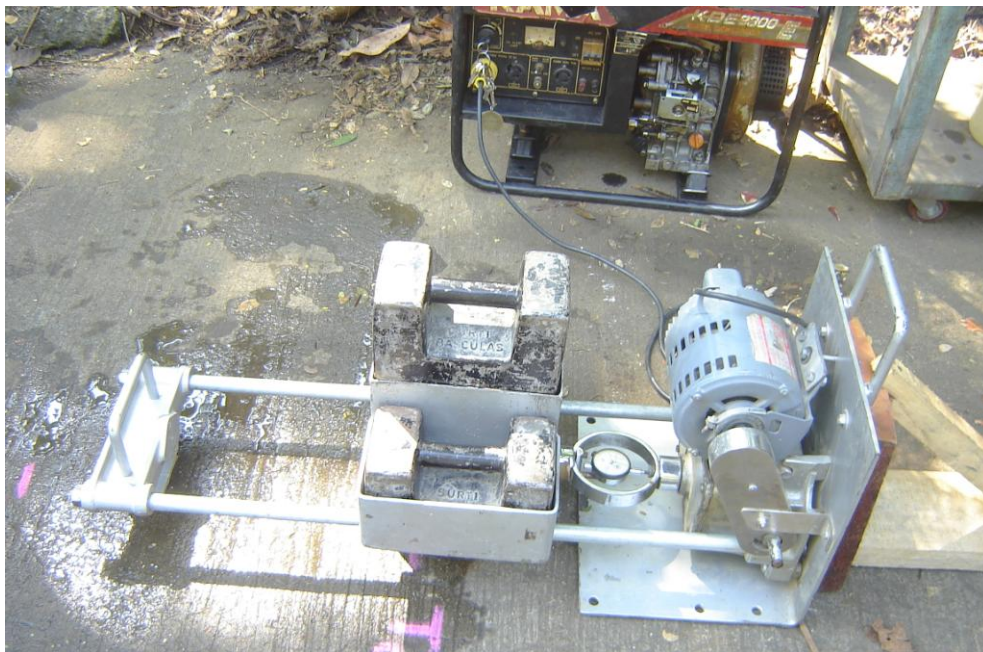


Soportes externos.

Imagen 16. Componentes Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF)



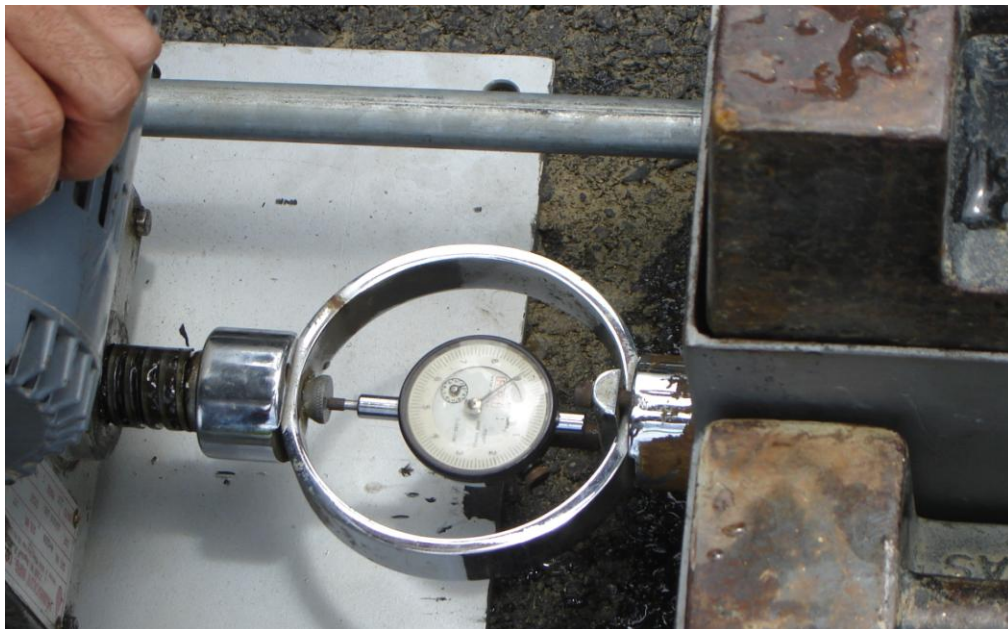
Fotografía 1. EDCF real



Fotografía 2. Instalación completa EDCF



Fotografía 3. Motor EDCF



Fotografía 4. Lectura en el anillo de carga

9. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN ENTRE EL NEUMÁTICO Y LA CALZADA DE UN PAVIMENTO

1. OBJETIVO

El objetivo de este ensayo es determinar el coeficiente de fricción entre el neumático y la calzada de un pavimento conocido el valor de la lectura en el anillo de carga mediante el uso del Equipo para la determinación del coeficiente de fricción (EDCF)

2. RESUMEN DEL MÉTODO

El ensayo consiste en una maquina (Ver Figura 3). En la cual la parte cargada con las pesas es desplazada lentamente por el tornillo que se encuentra en la caja de la parte central de la platina vertical, en una distancia de por lo menos 1 in o hasta que la lectura del anillo de carga sea estable.

Dicho valor de la lectura del anillo de carga (F) será usado para el cálculo del coeficiente de fricción (μ) con el uso de la formula básica $F = \mu N$ donde la fuerza normal (N) es el peso propio de la cajuela más las cinco pesas de 20 Kg cada una, para un total de 134,265 kg. Dicho valor de μ se hallara entonces del despeje de la formula presentada anteriormente.

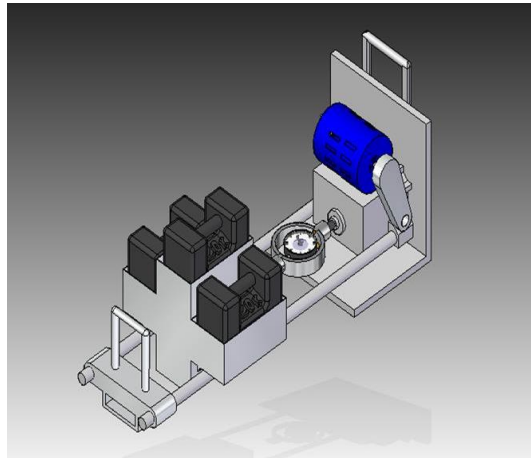


Imagen 15. Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF)

3. APARATOS Y MATERIALES

- a) Equipo para la determinación del coeficiente de fricción (EDCF).
- b) Cinco pesas de 20 kg cada una.
- c) Un anillo de carga para la lectura de la fuerza aplicada (F).
- d) Una planta eléctrica para encender el motor que desplazará la parte cargada de la máquina.
- e) Una escoba para limpiar la superficie a estudiar.
- f) Un recipiente plástico para guardar agua e hidratar la superficie antes de realizar el ensayo.
- g) Una pieza en madera para brindar estabilidad a la maquina una vez encendida que será aprisionada por una llanta del vehículo en el cual se transporten todos los materiales.

4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

- a) Limpiar de toda impureza la superficie a estudiar mediante el uso de una escoba.
- b) Hidratar la superficie que se estudiará.
- c) Ubicar el Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF) en la zona de estudio con el anillo de carga instalado.
- d) Encender la planta eléctrica y encender el motor del Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF) que desplazara la cajuela cargada con las pesas.
- e) Finalmente tomar la lectura del anillo de carga dato que será usado para el cálculo del coeficiente de fricción.

5. CÁLCULOS

Una vez conocido el valor de la fuerza necesaria para desplazar los 134,265 kg del peso propio de la cajuela más las cinco pesas de 20 kg cada una, se procede a calcular el coeficiente de fricción con ayuda de la fórmula:

$$F = \mu N$$

Donde F será multiplicada por el valor de la constante del anillo de carga en este caso $2lb/(10^{-4}PL)$, N será 134,265 kg y finalmente se obtiene el valor del Coeficiente de Fricción. Recordando siempre trabajar en las mismas unidades.

6. INFORME

En el informe se deberá registrar los datos de las lecturas del anillo de carga, el valor del coeficiente calculado y para referenciar el punto con la zona de estudio se deberá registrar el abscisado de la carretera y tipo de pavimento el cual se está evaluando. De igual forma se podrá hacer una breve descripción visual del estado de la capa de rodadura. Se podrá utilizar el siguiente formato como modelo para el registro de datos en campo.

PUNTO	ABSCISA	LECTURAS			COEFICIENTE DE FRICCIÓN			TIPO PAVIMENTO	DESCRIPCION
		L1	L2	L3	CF1	CF2	CF3		
P1									
P2									
P3									
P4									
P5									

10. FASE EXPERIMENTAL

10.1 ENSAYOS DE CALIBRACIÓN MÁQUINA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN PAVIMENTOS

Para el desarrollo experimental de este trabajo se realizaron ensayos en las instalaciones de la Universidad del Valle siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se establecieron 80 puntos para realizar las pruebas en las vías internas de la universidad, cada punto separado una distancia de 20m entre sí. De los 80 puntos, 60 ensayos se realizaron en pavimentos rígidos y 14 en pavimentos flexibles.
- En cada punto se realizaron 4 lecturas por punto, cada lectura se realizó a una distancia de 15 cm longitudinalmente.
- Finalmente, por cuestión de seguridad y para no alterar el flujo vehicular se realizaron 38 ensayos en pavimento flexible ubicado en cercanías a Zarzal Valle, 18 de ellos en una vía fuera de servicio, y 20 ensayos en una vía totalmente nueva y que aún no está en funcionamiento.
- Los ensayos realizados cerca a Zarzal-Valle contaron con tres lecturas por punto, ya que en la etapa de calibración del equipo se observó poca variabilidad en pavimentos flexibles.

Cada lectura se registró en un anillo de carga con una constante de $2lb/(10^{-4}PL)$ para finalmente obtener el valor del coeficiente de fricción. A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada punto con su respectivo coeficiente de fricción.

Resumen:

TIPO DE PAVIMENTO	PUNTOS	CANTIDAD	LECTURAS	UBICACIÓN
Pav. Rígido	P 1 - P60	60	240	Univalle
Pav. Flexible	P61 - P74	14	56	Univalle
Pav. Rígido	P75 - P80	6	24	Univalle
Pav. Flexible - Sin servicio	P81 - P98	18	54	Zarzal
Pav. Flexible – Nueva	P99 - P118	20	60	Zarzal
TOTAL		118	434	

- Las vías estudiadas no presentan fallas, solo se estudiaron vías en buen estado.

10.2 LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS ESTUDIADAS

Puntos estudiados dentro de la Universidad del Valle:



Imagen 17. Localización general de ensayos Universidad del Valle.

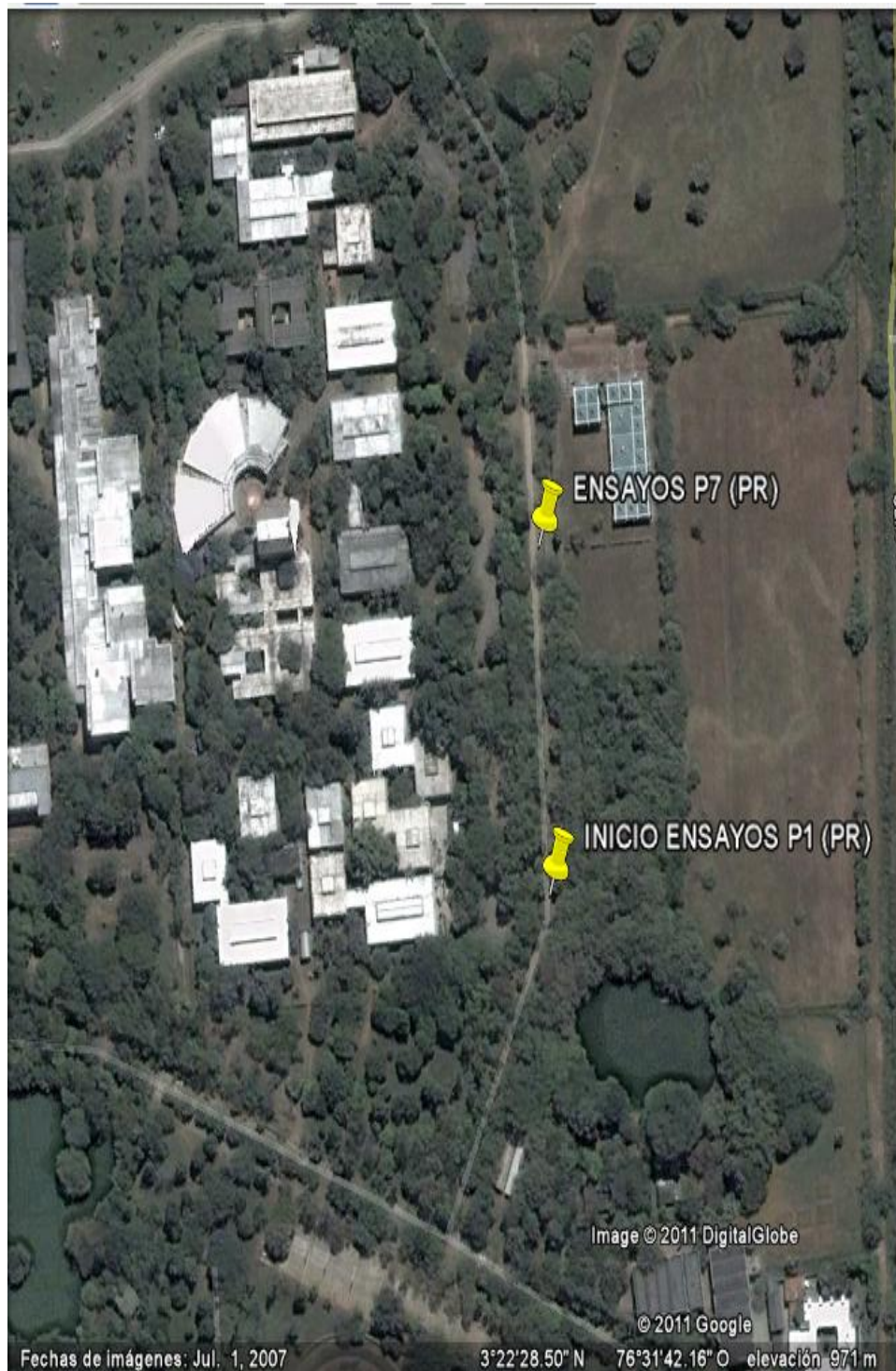


Imagen 18. Ensayos P1-P7 pavimento rígido (PR) Univalle



Imagen 19. Ensayos P7-P35 pavimento rígido (PR) Univalle



Imagen 20. Ensayos P36 - P60 pavimento rígido (PR) Univalle



Imagen 21. Ensayos P61– P74 pavimento flexible (PF) Univalle



Imagen 22. Ensayos P75 – P80 pavimento rígido (PR) Univalle

Puntos estudiados en cercanías de Zarzal-Valle:



Imagen 23. Ubicación general Zarzal -Valle



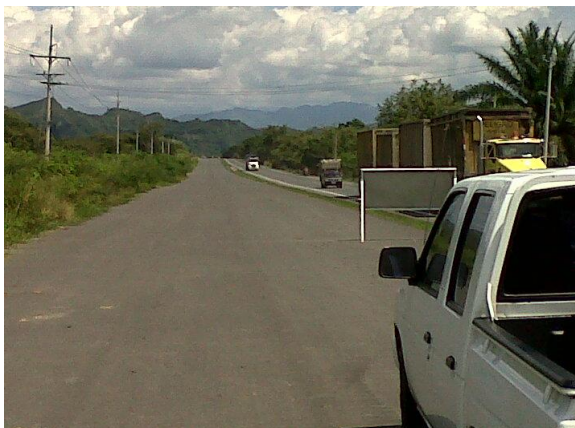
Imagen 24. Mapa de obras concesionario PISA S.A.



Fotografía 5. Calzada vieja vía La Victoria –
Zarzal Valle



Fotografía 6. Calzada nueva vía La Paila – Zarzal
(Valle)



Fotografía 7. Calzada nueva vía Paila – Zarzal
Valle

Los puntos estudiados en la zona del norte del Valle vía La Paila- Zarzal, se realizaron en el sector Garcero para el caso de la vía nueva que no se encuentra en funcionamiento arrancando en la abscisa K1+700. En el caso del tramo fuera de servicio se realizó en la vía Zarzal – La Victoria en la abscisa K15+000. A continuación se muestran las dimensiones de la vía y las abscisas respectivas.

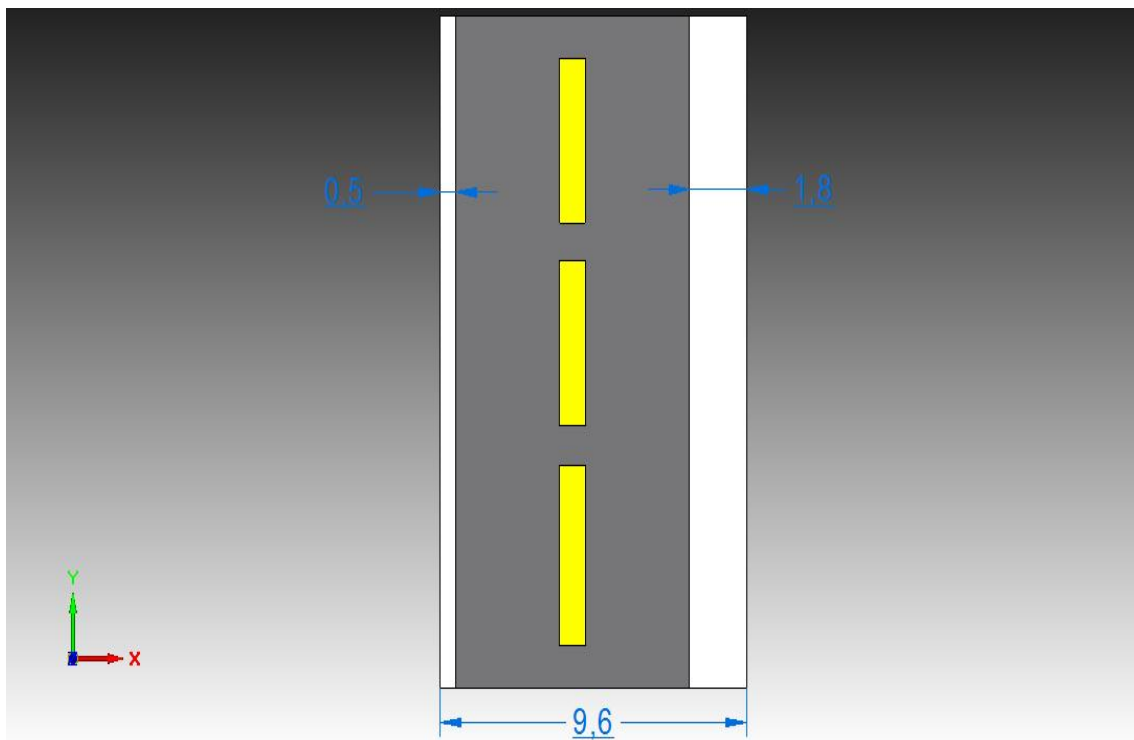


Imagen 25. Dimensiones de la vía

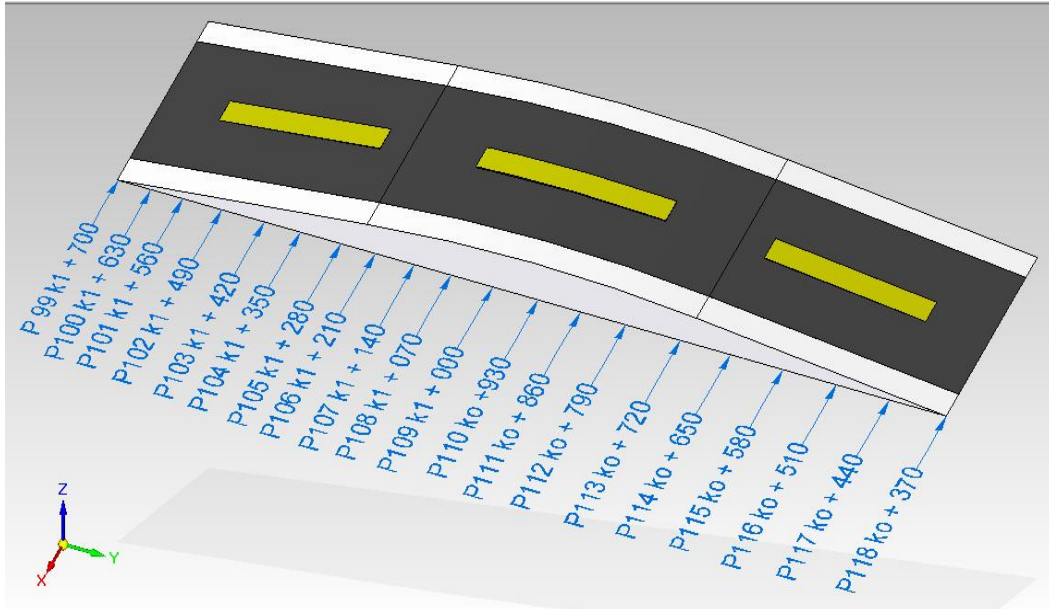


Imagen 26. Calzada nueva vía La Paila – Zarzal (Valle)

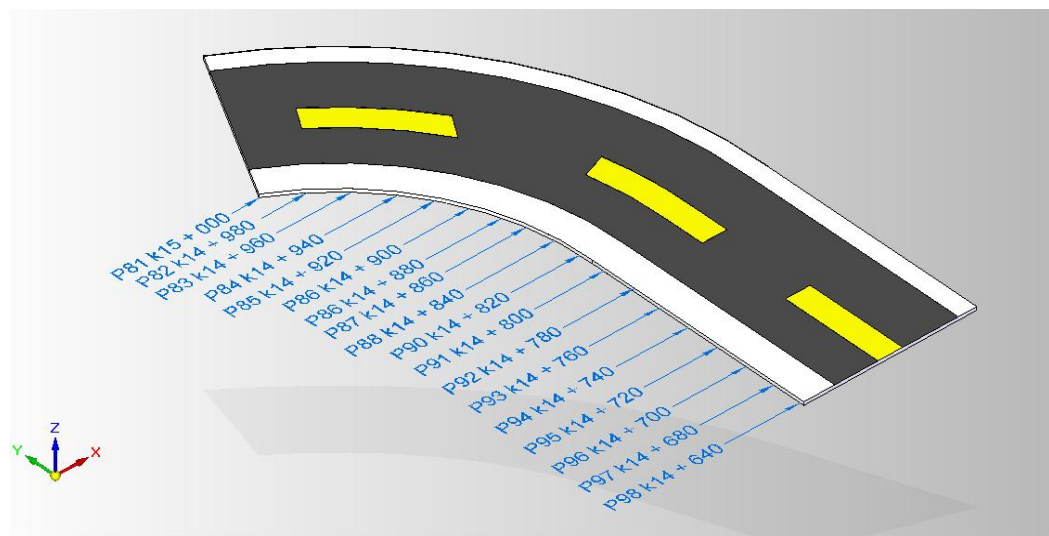


Imagen 27. Calzada vieja vía La Victoria – Zarzal (Valle)

10.3 PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Para el desarrollo de ensayos se utilizó la siguiente metodología:

- Se limpia con una escoba el área del pavimento que se ensayará. Teniendo en cuenta la total remoción de piedras, hojas, barro o cualquier tipo de partículas que pueda afectar los resultados del ensayo.
- Se moja el pavimento con abundante agua, para así hacer el ensayo bajo la condición crítica.



Fotografía 8. Preparación superficie a estudiar

- Se hace el montaje del equipo sobre la superficie a ensayar.



Fotografía 9. Montaje del equipo en la zona de estudio

- Se instala en el equipo las 5 pesas y el anillo de carga.



Fotografía 10. Instalación completa del equipo

- Por seguridad las personas que manipulen el quipo deben protegerse con guantes, tapabocas y tapa oídos antes de poner en marcha la planta eléctrica que nos permitirá poner en marcha el equipo.



Fotografía 11. Seguridad operario

- Se pone en marcha la planta eléctrica y se enciende el motor del equipo.



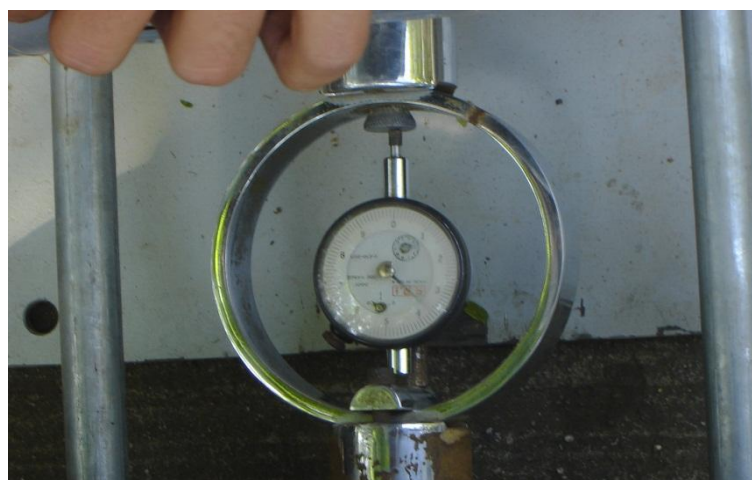
Fotografía 12. Funcionamiento planta eléctrica

- Al ser encendido el motor la tuerca que sostiene al anillo de carga empieza a desplazarse haciendo que este empuje las pesas a 1 in de distancia.



Fotografía 13. Desplazamiento maquina

- Se realiza la lectura del anillo de carga.



Fotografía 14. Lectura anillo de carga

- Se devuelve el tornillo, se apaga el motor, la planta de energía y se desmontan las pesas para poder mover el equipo hacia el siguiente punto.



Fotografía 15. Desmonte equipo

10.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Los puntos resaltados son descartados en el análisis de datos.

FASE EXPERIMENTAL- PROPUESTA DE ENSAYO PARA LA DETERMINACION
DEL COEFICIENTE
DE FRICCION ENTRE EL NEUMATICO Y LA CALZADA DE UN PAVIMENTO

A CADA PUNTO SE LE ASIGNO LA LETRA **P** SEGUIDO DEL
NUMERO DEL ENSAYO
PARA EL COEFICIENTE DE FRICCION SE LE ASIGNO UNA LETRA **CF**
SEGUIDA DEL NUMERO ENSAYO

PUNTO	LECTURAS				COEFICIENTE DE FRICCION			
	L1(lb)	L2(lb)	L3(lb)	L4(lb)	CF1	CF2	CF3	CF4
P1	128	137	139	113	0,8667	0,9276	0,9412	0,7651
P2	84	94	130	115	0,5688	0,6365	0,8802	0,7787
P3	108	114	98	105	0,7313	0,7719	0,6635	0,7109
P4	118	117	97	105	0,799	0,7922	0,6568	0,7109
P5	116	88	90	98	0,7854	0,5958	0,6094	0,6635
P6	118	118	95	119	0,799	0,799	0,6432	0,8057
P7	107	75	130	113	0,7245	0,5078	0,8802	0,7651

PUNTO	LECTURAS				COEFICIENTE DE FRICCIÓN			
	L1(lb)	L2(lb)	L3(lb)	L4(lb)	CF1	CF2	CF3	CF4
P8	103	112	99	97	0,6974	0,7583	0,6703	0,6568
P9	93	80	89	94	0,6297	0,5417	0,6026	0,6365
P10	110	103	117	121	0,7448	0,6974	0,7922	0,8193
P11	104	89	96	103	0,7042	0,6026	0,65	0,6974
P12	97	103	125	112	0,6568	0,6974	0,8464	0,7583
P13	109	99	105	102	0,738	0,6703	0,7109	0,6906
P14	95	114	106	96	0,6432	0,7719	0,7177	0,65
P15	85	98	98	107	0,5755	0,6635	0,6635	0,7245
P16	85	105	92	111	0,5755	0,7109	0,6229	0,7516
P17	109	96	104	102	0,738	0,65	0,7042	0,6906
P18	98	108	98	97	0,6635	0,7313	0,6635	0,6568
P19	93	106	96	102	0,6297	0,7177	0,65	0,6906
P20	89	105	123	98	0,6026	0,7109	0,8328	0,6635
P21	98	101	109	114	0,6635	0,6839	0,738	0,7719
P22	104	85	82	105	0,7042	0,5755	0,5552	0,7109
P23	103	97	95	87	0,6974	0,6568	0,6432	0,5891
P24	105	94	91	92	0,7109	0,6365	0,6161	0,6229
P25	96	86	85	94	0,65	0,5823	0,5755	0,6365
P26	97	93	96	89	0,6568	0,6297	0,65	0,6026
P27	91	108	97	122	0,6161	0,7313	0,6568	0,826
P28	97	78	71	85	0,6568	0,5281	0,4807	0,5755
P29	94	102	85	95	0,6365	0,6906	0,5755	0,6432
P30	89	85	79	81	0,6026	0,5755	0,5349	0,5484
P31	94	85	88	93	0,6365	0,5755	0,5958	0,6297
P32	91	85	88	93	0,6161	0,5755	0,5958	0,6297
P33	90	97	86	103	0,6094	0,6568	0,5823	0,6974
P34	87	88	108	108	0,5891	0,5958	0,7313	0,7313
P35	106	108	94	99	0,7177	0,7313	0,6365	0,6703

PUNTO	LECTURAS				COEFICIENTE DE FRICCIÓN			
	L1(lb)	L2(lb)	L3(lb)	L4(lb)	CF1	CF2	CF3	CF4
P36	93	93	69	79	0,6297	0,6297	0,4672	0,5349
P37	89	72	72	87	0,6026	0,4875	0,4875	0,5891
P38	96	79	96	98	0,6500	0,5349	0,6500	0,6635
P39	99	88	94	86	0,6703	0,5958	0,6365	0,5823
P40	89	98	96	92	0,6026	0,6635	0,6500	0,6229
P41	88	89	80	81	0,5958	0,6026	0,5417	0,5484
P42	88	94	101	103	0,5958	0,6365	0,6839	0,6974
P43	103	88	61	81	0,6974	0,5958	0,4130	0,5484
P44	64	75	104	87	0,4333	0,5078	0,7042	0,5891
P45	73	66	80	78	0,4943	0,4469	0,5417	0,5281
P46	74	78	85	72	0,5010	0,5281	0,5755	0,4875
P47	64	61	69	58	0,4333	0,4130	0,4672	0,3927
P48	82	74	71	73	0,5552	0,5010	0,4807	0,4943
P49	78	79	74	84	0,5281	0,5349	0,5010	0,5688
P50	81	81	82	84	0,5484	0,5484	0,5552	0,5688
P51	87	75	85	80	0,5891	0,5078	0,5755	0,5417
P52	55	40	53	49	0,3724	0,2708	0,3589	0,3318
P53	72	69	78	68	0,4875	0,4672	0,5281	0,4604
P54	85	63	58	76	0,5755	0,4266	0,3927	0,5146
P55	74	69	57	68	0,5010	0,4672	0,3859	0,4604
P56	72	54	37	64	0,4875	0,3656	0,2505	0,4333
P57	90	87	86	75	0,6094	0,5891	0,5823	0,5078
P58	68	70	69	92	0,4604	0,4740	0,4672	0,6229
P59	76	73	72	74	0,5146	0,4943	0,4875	0,5010
P60	68	54	59	54	0,4604	0,3656	0,3995	0,3656
P61	70	68	71	73	0,4740	0,4604	0,4807	0,4943
P62	70	73	76	78	0,4740	0,4943	0,5146	0,5281
P63	74	74	65	73	0,5010	0,5010	0,4401	0,4943
P64	72	83	82	82	0,4875	0,5620	0,5552	0,5552
P65	72	73	75	83	0,4875	0,4943	0,5078	0,5620
P66	67	68	59	77	0,4536	0,4604	0,3995	0,5214
P67	78	81	74	66	0,5281	0,5484	0,5010	0,4469
P68	79	84	79	79	0,5349	0,5688	0,5349	0,5349
P69	63	78	73	63	0,4266	0,5281	0,4943	0,4266
P70	74	72	72	68	0,5010	0,4875	0,4875	0,4604
P71	80	91	87	78	0,5417	0,6161	0,5891	0,5281
P72	70	56	67	64	0,4740	0,3792	0,4536	0,4333
P73	70	71	82	70	0,4740	0,4807	0,5552	0,4740
P74	78	72	75	71	0,5281	0,4875	0,5078	0,4807
P75	98	103	98	75	0,6635	0,6974	0,6635	0,5078
P76	84	85	84	65	0,5688	0,5755	0,5688	0,4401
P77	92	95	97	97	0,6229	0,6432	0,6568	0,6568
P78	92	88	99	106	0,6229	0,5958	0,6703	0,7177
P79	87	91	92	89	0,5891	0,6161	0,6229	0,6026
P80	94	87	118	101	0,6365	0,5891	0,7990	0,6839

PUNTO	LECTURAS			COEFICIENTE DE FRICCIÓN		
	L1(lb)	L2(lb)	L3(lb)	CF1	CF2	CF3
P81	69	60	67	0,4672	0,4063	0,4536
P82	54	64	64	0,3656	0,4333	0,4333
P83	64	63	60	0,4333	0,4266	0,4063
P84	55	54	56	0,3724	0,3656	0,3792
P85	54	54	56	0,3656	0,3656	0,3792
P86	48	51	48	0,3250	0,3453	0,3250
P87	43	56	59	0,2911	0,3792	0,3995
P88	51	51	51	0,3453	0,3453	0,3453
P89	47	52	49	0,3182	0,3521	0,3318
P90	50	54	56	0,3385	0,3656	0,3792
P91	51	49	51	0,3453	0,3318	0,3453
P92	57	64	57	0,3859	0,4333	0,3859
P93	64	73	78	0,4333	0,4943	0,5281
P94	60	62	58	0,4063	0,4198	0,3927
P95	57	58	56	0,3859	0,3927	0,3792
P96	56	60	57	0,3792	0,4063	0,3859
P97	64	58	56	0,4333	0,3927	0,3792
P98	57	60	57	0,3859	0,4063	0,3859

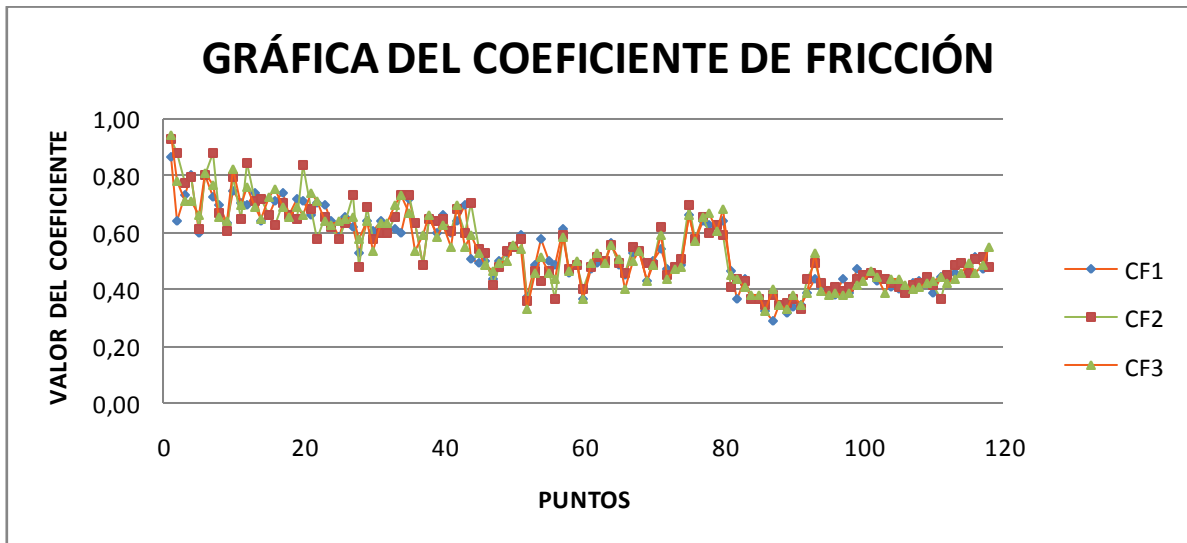
Ensayos realizados en Zarzal-Valle (Carpeta fuera de servicio)

	LECTURAS			COEFICIENTE DE FRICCIÓN		
PUNTO	L1(lb)	L2(lb)	L3(lb)	CF1	CF2	CF3
P99	70	64	61	0,4740	0,4333	0,4130
P100	66	67	63	0,4469	0,4536	0,4266
P101	68	68	69	0,4604	0,4604	0,4672
P102	63	67	66	0,4266	0,4536	0,4469
P103	64	64	57	0,4333	0,4333	0,3859
P104	60	62	64	0,4063	0,4198	0,4333
P105	59	60	64	0,3995	0,4063	0,4333
P106	59	57	61	0,3995	0,3859	0,4130
P107	62	61	59	0,4198	0,4130	0,3995
P108	63	62	60	0,4266	0,4198	0,4063
P109	62	66	62	0,4198	0,4469	0,4198
P110	57	61	63	0,3859	0,4130	0,4266
P111	65	54	66	0,4401	0,3656	0,4469
P112	64	67	62	0,4333	0,4536	0,4198
P113	68	72	64	0,4604	0,4875	0,4333
P114	73	73	68	0,4943	0,4943	0,4604
P115	69	68	73	0,4672	0,4604	0,4943
P116	76	75	68	0,5146	0,5078	0,4604
P117	70	76	72	0,4740	0,5146	0,4875
P118	71	71	81	0,4807	0,4807	0,5484

Ensayos realizados en Zarzal-Valle (Carpeta nueva sin funcionar)

10.5 PRESENTACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS

A continuación se muestran los gráficos de resumen y de dispersión de los resultados calculados del coeficiente de fricción en la fase experimental.



Gráfica 1. Dispersión total – resultados obtenidos

11. ANALISIS DE RESULTADOS

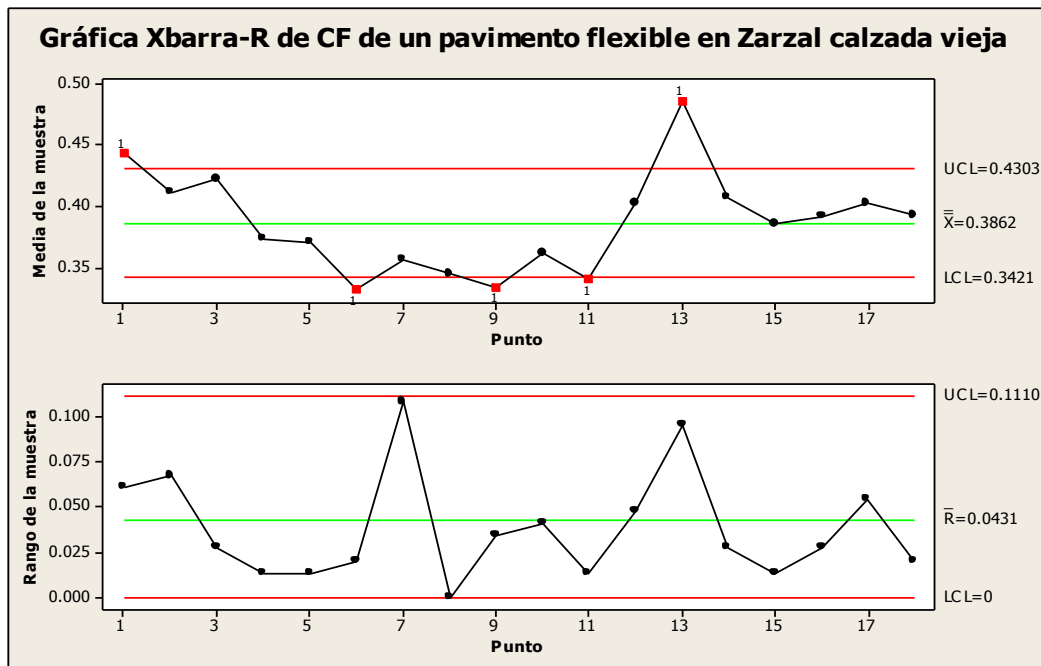
Para conocer las características de la serie de datos obtenidos se usan los conocimientos básicos de la estadística descriptiva. Obteniendo un resumen de las medidas de descripción tanto de centralización (media, mediana, moda) como de dispersión (varianza, desviación típica, coeficiente de variación, rango). Dichas medidas de tendencia central tienen como objetivo sintetizar los datos en un valor representativo, las medidas de dispersión nos dicen hasta que punto estas medidas de tendencia central son representativas como síntesis de la información.

A continuación se muestra la tabla de resumen con tales valores:

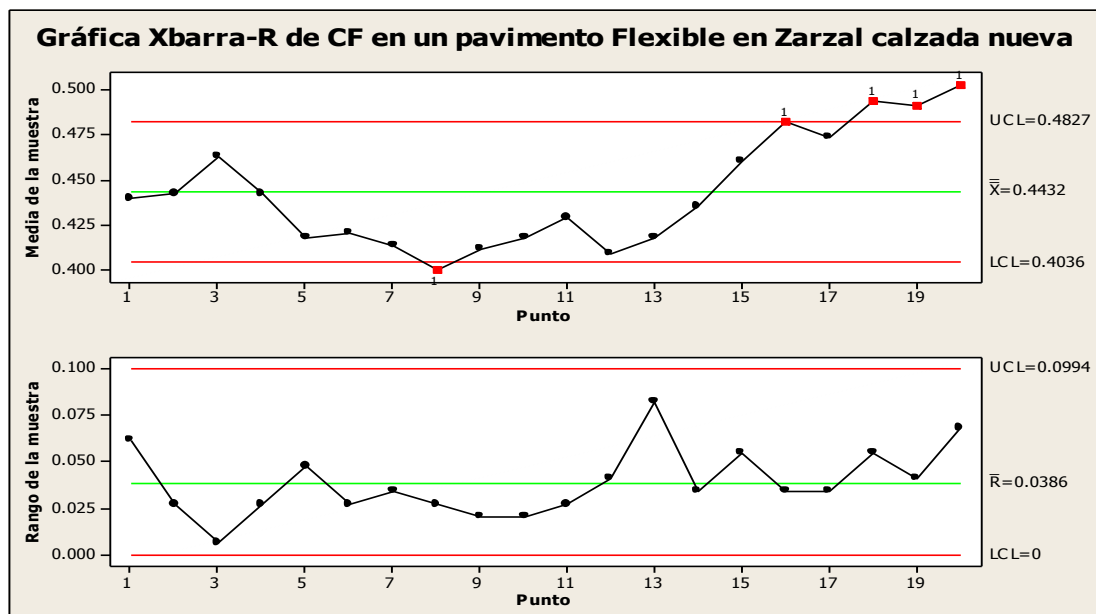
PROMEDIO	0,5419
MEDIA	0,5146
MODA	0,4333
VARIANZA	0,0168
DESVIACION	0,1295
COEF. DE VARIACION	0,2516
RANGO	0,6501

Tabla 22. Medidas de tendencia central

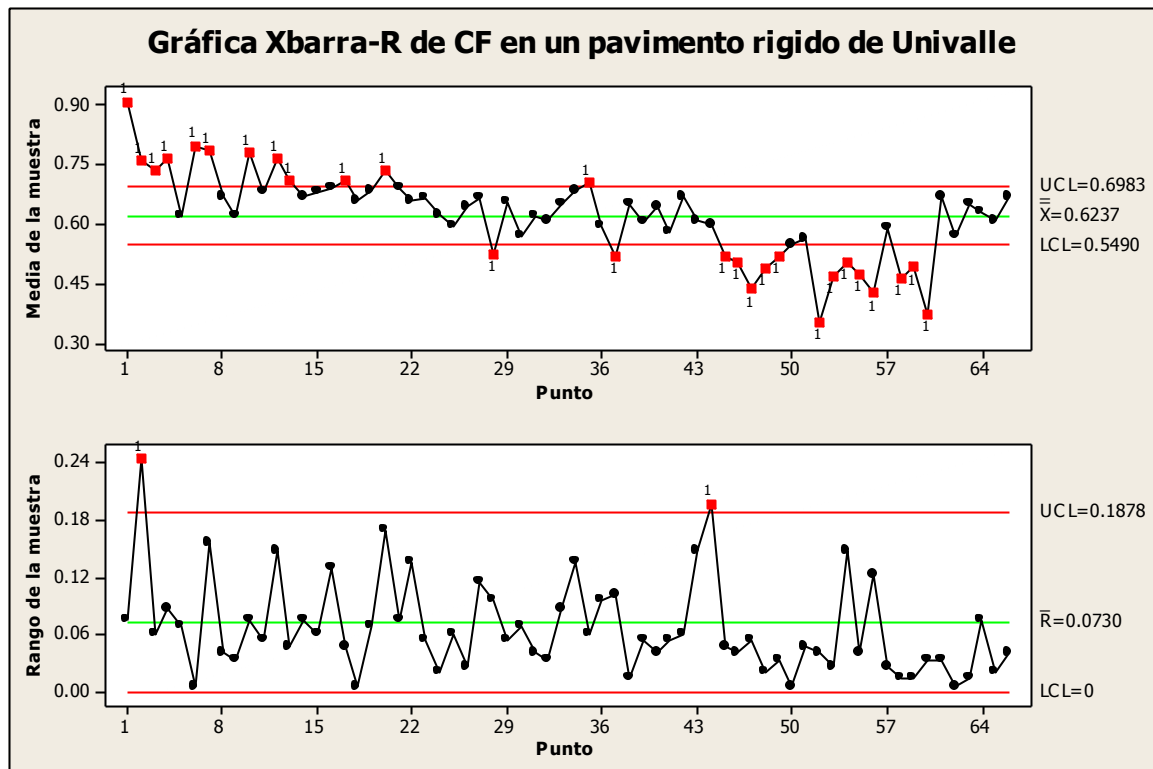
Una vez organizados los datos se procede al análisis de estos mediante el software de herramientas estadísticas MINITAB versión 15 (Ver anexo B), obteniendo los siguientes resultados en gráficas.



Gráfica 2. Control para el Coeficiente de Fricción sobre la calzada vieja de Zarzal

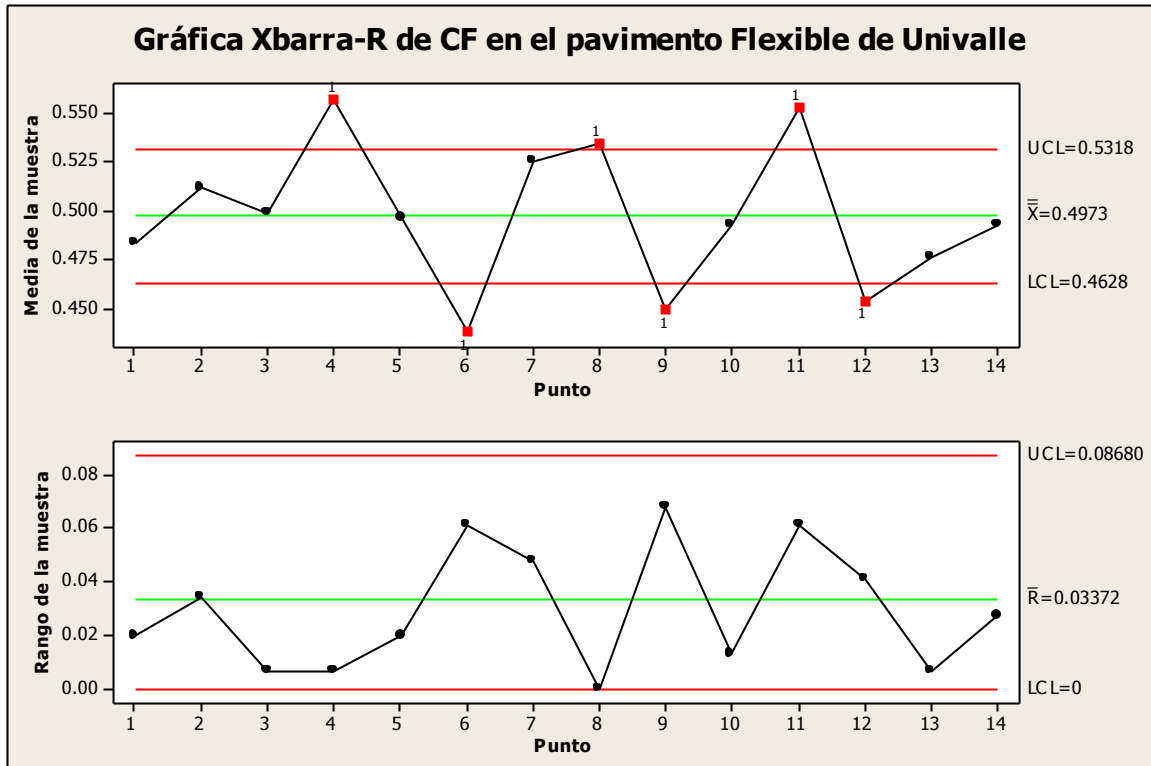


Gráfica 3. Control para el Coeficiente de Fricción sobre la calzada nueva de Zarzal



Gráfica 4. Control para el Coeficiente de Fricción sobre pavimento rígido de Univalle

En las Gráficas 2, 3 y 4 se observa que existen tendencias crecientes y decrecientes en el gráfico de los promedios, la cual se puede haber dado debido a dos fuentes de variabilidad: la superficie donde se llevaron a cabo las mediciones no se encuentra en buen estado o el instrumento de medición se está descalibrando a medida que se toman nuevas mediciones. Por ello, se plantea la hipótesis de que la tendencia se deba a efectos del azar, es decir, las observaciones sucesivas son independientes, por tanto posteriormente se realizara la prueba de rachas para contrastar dicha hipótesis.



Gráfica 5. Control para el Coeficiente de Fricción sobre pavimento flexible de Univalle

En la Gráfica 5 se aprecia que las mediciones tomadas en el pavimento flexible de la Universidad del Valle presentan estabilidad tanto en los promedios como en los rangos, sin embargo, se realizará la prueba de rachas (Ver anexo B pág. 112) para validar la hipótesis de aleatoriedad en las mediciones

En cuanto al gráfico de los Rangos se puede apreciar que en todas las superficies la variación dentro de los puntos es estable, además, al igual que para los promedios se realizarán la prueba de rachas debido a que aunque los gráficos muestran estabilidad se presentan algunas tendencias.

Al realizar esta prueba se presentaron los siguientes resultados

PAVIMENTO	VALOR P PRUEBA DE RACHAS	
	PROMEDIO	RANGO
Rígido Univalle	0	0,987
Flexible Univalle	0,032	0,516
Flexible Zarzal-calzada vieja	0,012	0,82
Flexible Zarzal-calzada nueva	0	0,443

Tabla 23. Valores p de la prueba de rachas para los promedios y los rangos

De acuerdo a la Tabla 23, con un nivel de significancia $\alpha=5\%$ la tendencia observada en los promedios no es significativa (Valor $p < \alpha$), es decir, estos patrones no se deben a causas aleatorias, por tanto para este caso se debe plantear la hipótesis de que el pavimento presenta variación en su superficie o la maquina se está descalibrando al tomar nuevas mediciones; mientras que para las tendencias que muestra el grafico para los rangos ocurre lo contrario, es decir, el instrumento es consistente (Valor $p > \alpha$).

Por otra parte para analizar si el instrumento es consistente en los diferentes tramos de vías se calculará la desviación estándar $\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$ para cada uno de estos.

PAVIMENTO	DESVIACION ESTANDAR
Rígido Univalle	0,0431187
Flexible Univalle	0,0199173
Flexible Zarzal-calzada vieja	0,0254578
Flexible Zarzal-calzada nueva	0,0227998

Tabla 24. Desviación estándar para los diferentes tramos de carretera

De acuerdo a la Tabla 24, debido a que las desviaciones estándar son muy cercanas se puede concluir que independientemente del pavimento la variabilidad del instrumento es similar.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El Equipo creado para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF), aunque no está homologado actualmente, cumple con su función, es una herramienta que facilita la evaluación del estado superficial de una vía y es consistente en las lecturas.
- La variación de los resultados vistos dependen directamente del estado superficial de la capa de rodadura.
- La mala hidratación de la superficie antes del ensayo afecta los resultados, es por eso que se recomienda hacerlo una vez y esparcir bien el agua en la zona en estudio.

Para los ensayos realizados en pavimento rígido dentro de la Universidad del Valle:

- Se obtuvieron los coeficientes de fricción más altos, cuyos valores oscilan entre 0,9412 y 0,4266, dependiendo de la calidad de la superficie. Dichos valores se pueden verificar en la pag., donde se encuentran los puntos P1-P60 y P75-P80.
- Concretamente en los ensayos realizados sobre pavimento rígido se obtiene grandes valores de dicho coeficiente debido a su excelente estado, ya que en algunas zonas de las vías de la Universidad del Valle, el flujo vehicular se concentra en la parte central de la vía. No estando expuesta a un fuerte desgaste las orillas donde se realizaron los ensayos.
- En el caso de los datos obtenidos en el parqueadero a pesar de que la losa de concreto presenta algunas grietas se encuentran en un rango promedio 0,5688 - 0,6703.

- Dentro de los ensayos realizados entre los puntos P44 y P60, se observa desgaste y pulimiento en la superficie del pavimento, disminuyendo el valor del coeficiente entre 0,3318 – 0,6094.

Para los ensayos realizados sobre pavimento flexible dentro de la Universidad del Valle en el tramo que comunica con el barrio El Ingenio (Imagen 15.) se puede concluir:

- Al ser un pavimento con pocos meses de uso y buena condición superficial, el coeficiente de fricción obtenido de los puntos P61 al P74 presenta una variación de valores entre 0,4266 y 0,6635. Estando en el rango promedio.

Para las zonas estudiadas sobre pavimento flexible en cercanías de Zarzal – Valle, y según el caso se obtiene:

- Los ensayos realizados en pavimento flexible y carpeta nueva ubicada en la vía que comunica el municipio de La Paila con Zarzal (Valle), presentan una tendencia muy parecida a los resultados obtenidos en la Universidad del valle para pavimentos flexibles. Obteniendo resultados que varían de 0,3859 a 0,5484, puntos P99 al P118.
- El tramo de vía fuera de servicio debido a la construcción de la variante, que comunica el municipio de Zarzal con La victoria (Valle), presenta buenas condiciones a simple vista, aunque los resultados obtenidos muestran una leve baja en comparación a la calzada totalmente nueva. Los valores se encuentran entre 0,2911 y 0,5281.
- Comparando los resultados obtenidos mediante el uso del Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF), se observa similitud con los resultados obtenidos de los estudios realizados utilizando el equipo Mu Meter en Argentina y el SCRIM en Chile para todo tipo de vía.

Se recomienda seguir el procedimiento de ensayo planteado en el capítulo 9 en cualquier tipo de pavimento, para evitar variaciones en los ensayos a realizar sobre un tramo de vía en estudio.

Es recomendable realizar un próximo estudio al Equipo para la Determinación del Coeficiente de Fricción (EDCF), para comparar los resultados obtenidos con otro dispositivo empleado para la determinación de dicho coeficiente con el fin de hacer una correlación entre ellos.

13. ANEXOS

ANEXO A: TAMAÑO DE LA MUESTRA

Para determinar el número de ensayos que se realizarán debemos tener en cuenta lo siguiente:

1. El porcentaje de confianza con el cual se quiere generalizar los datos desde la muestra hacia la población total.
2. El porcentaje de error que se pretende aceptar al momento de hacer la generalización.
3. El nivel de variabilidad que se calcula para comprobar la hipótesis.

La **confianza** o el **porcentaje de confianza** es el porcentaje de seguridad que existe para generalizar los resultados obtenidos. Esto quiere decir que un porcentaje del 100% equivale a decir que no existe ninguna duda para generalizar tales resultados, pero también implica estudiar a la totalidad de los casos de la población.

Para evitar un costo muy alto para el estudio o debido a que en ocasiones llega a ser prácticamente imposible el estudio de todos los casos, entonces se busca un porcentaje de confianza menor. Comúnmente en las investigaciones sociales se busca un 95%.

El **error** o **porcentaje de error** equivale a elegir una probabilidad de aceptar una hipótesis que sea falsa como si fuera verdadera, o la inversa: rechazar a hipótesis verdadera por considerarla falsa. Al igual que en el caso de la confianza, si se quiere eliminar el riesgo del error y considerarlo como 0%, entonces la muestra es del mismo tamaño que la población, por lo que conviene correr un cierto riesgo de equivocarse.

Comúnmente se aceptan entre el 4% y el 6% como error, tomando en cuenta de que **no** son complementarios la confianza y el error.

La **variabilidad** es la probabilidad (o porcentaje) con el que se aceptó y se rechazó la hipótesis que se quiere investigar en algún sondeo anterior o en un ensayo previo al estudio actual. El porcentaje con que se aceptó tal hipótesis se denomina **variabilidad positiva** y se denota por p , y el porcentaje con el que se rechazó se la hipótesis es la **variabilidad negativa**, denotada por q .

Hay que considerar que p y q son complementarios, es decir, que su suma es igual a la unidad: $p+q=1$. Además, cuando se habla de la máxima variabilidad, en el caso de no existir antecedentes sobre la investigación (no hay otras o no se pudo aplicar una prueba previa), entonces los valores de variabilidad es $p=q=0.5$.

Una vez que se han determinado estos tres factores, entonces se puede calcular el tamaño de la muestra como a continuación se expone.

Se presentan dos fórmulas, siendo la primera la que se aplica en el caso de que **no se conozca con precisión el tamaño de la población**, y es:

$$n = \frac{Z^2 p q}{E^2}$$

Dónde:

n es el tamaño de la muestra;

Z es el nivel de confianza;

p es la variabilidad positiva;

q es la variabilidad negativa;

E es la precisión o error.

Hay que tomar nota de que debido a que la variabilidad y el error se pueden expresar por medio de porcentajes, hay que convertir todos esos valores a proporciones en el caso necesario.

También hay que tomar en cuenta que el nivel de confianza no es ni un porcentaje, ni la proporción que le correspondería, a pesar de que se expresa en términos de porcentajes. El nivel de confianza se obtiene a partir de la distribución normal estándar, pues la proporción correspondiente al porcentaje de confianza es el área simétrica bajo la curva normal que se toma como la confianza, y la intención es buscar el valor Z de la variable aleatoria que corresponda a tal área.

Se considerará una confianza del 95%, un porcentaje de error del 5% y la máxima variabilidad por no existir antecedentes.

Primero habrá que obtener el valor de Z de tal forma que la confianza sea del 95%, es decir, buscar un valor de Z tal que $P(-Z < z < Z) = 0.95$. Utilizando las tablas o las funciones de *Excel* se pueden obtener, o viendo (en este caso) el ejemplo anterior, resulta que $Z = 1.96$.

De esta manera se realiza la sustitución y se obtiene:

$$n = \frac{(1.96^2)(0.5)(0.5)}{0.05^2} = \frac{(3.8416)(0.25)}{0.0025} = \frac{0.9604}{0.0025} = 384.16$$

Esto quiere decir que el tamaño de la muestra es de 385. En este estudio el total de la muestra fue de 434

ANEXO B: DESCRIPCION SOFTWARE MINITAB

Minitab es un paquete estadístico que abarca todos los aspectos necesarios para el aprendizaje y aplicación de la Estadística en general. Incluye análisis descriptivo, contrastes de hipótesis, regresión lineal y no lineal, series temporales, análisis de tiempos de fallo, control de calidad, análisis factorial, ANOVA, análisis cluster, etc.-, una potente capacidad gráfica –especialmente en las versiones 12 y 13-, total compatibilidad con las herramientas de Office – mediante las opciones de “copiar y pegar” es posible exportar datos, gráficos y texto-, herramientas de gestión de proyectos, conectividad ODBC para bases de datos, y un potente lenguaje de macros que permite automatizar y personalizar muchas de las tareas.

El ejercicio consiste en evaluar la consistencia de un nuevo instrumento que sirve para medir el coeficiente de fricción que se genera cuando los vehículos transitan por la vía, para ello se tomaron mediciones en dos tipos de pavimento (flexible y rígido) y en tramos de vía ubicados en Univalle y en cercanías de Zarzal-Valle; debido a que no existe una herramienta estándar con la cual realizar comparaciones se tomaron 3 muestras por cada punto en los cuatro tramos, se pretende entonces realizar gráficos de control $\bar{X} - R$ para cumplir con lo planteado prestando mucha atención sobre el grafico R , puesto que este me permite observar la consistencia del instrumento. Los resultados se obtuvieron en el software estadístico Minitab versión 15.

Gráficos de control para variables (Tipo Shewhart).

Un gráfico de control es un instrumento estadístico el cual se utiliza para evaluar si un proceso está o no en un estado de control estadístico, es decir cuando sólo actúan causas comunes o aleatorias, inherentes a cualquier proceso³. En estos gráficos se observa la estabilidad o la inestabilidad del proceso a través del tiempo.

El gráfico consiste en una línea central (L.C.) y dos pares de líneas límites espaciadas por encima y por debajo de la línea central, que se denominan límite de control superior (LCS) y límite de control inferior (L.C.I.).

A continuación se presentan los límites de control para el gráfico de control $\bar{X}$ y para R :

Gráficos de control $\bar{X} - R$

Suponga que se tiene una variable que se distribuye normalmente con media μ y desviación estándar σ , además se supone que son conocidos. Sea $x_1, x_2, \dots, x_n$ una muestra de n observaciones independientes e idénticamente distribuidas tomadas de un proceso de producción, entonces el promedio de esta muestra se distribuye como una variable normal con media μ y desviación estándar

$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Por lo tanto, los límites de control para cada muestra son

$$LCI = \mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$LCS = \mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde $Z_{\alpha/2}$ es el valor de la distribución normal estándar acumulada para una probabilidad $\alpha/2$ y α es la probabilidad de que una muestra bajo control se encuentre por fuera de estos límites.

3. Feigenbaum Armand V., 1994-Control de calidad total.3ra Edición-CESCA.

Sin embargo, en raras ocasiones se conocen los valores de μ y σ , en consecuencia, deben de ser estimados a partir de m muestras como sigue:

- Para la media μ se considera el estimador

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m}$$

- Para la estimación de σ se puede utilizar la desviación estándar o bien el rango medio de las muestras. Por ahora, se definirá el método del rango. El rango de la muestra es la diferencia entre la observación menor y mayor

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

Y el rango promedio está dado por

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}$$

Para la estimación de la varianza debe usarse $\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$, los valores de d_2 se encuentran en la tabla VI del apéndice.²

Entonces los parámetros del gráfico de control son:

2. Montgomery, Douglas C. Control Estadístico de la Calidad. 3 ed. México: Limusa Wiley, 2004.

$$LCI = \bar{\bar{x}} - \frac{Z_{\alpha/2}}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R}$$

$$LC = \bar{\bar{x}}$$

$$LCS = \bar{\bar{x}} + \frac{Z_{\alpha/2}}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R}$$

En el gráfico R, la línea central es $\bar{R}$. Para los límites de control es necesario un estimador de σ_R , bajo el supuesto de que la característica de calidad tiene una distribución normal y puesto que σ es desconocida, puede estimarse con

$$\hat{\sigma}_R = \frac{d_3 \bar{R}}{d_2}$$

Por consiguiente, los parámetros para el gráfico de control R son:

$$LCI = \bar{R} - \frac{Z_{\alpha/2} d_3}{d_2} \bar{R}$$

$$LC = \bar{R}$$

$$LCS = \bar{R} + \frac{Z_{\alpha/2} d_3}{d_2} \bar{R}$$

Prueba de rachas:

Una racha se define como una secuencia de valores muestrales con una característica común precedida y seguida por valores que no presentan esa característica. Así, se considera una racha la secuencia de k valores consecutivos superiores o iguales a la media muestral (o a la mediana o a la moda, o a cualquier otro valor de corte) siempre que estén precedidos y seguidos por valores inferiores a la media muestral (o a la mediana o a la moda, o a cualquier otro valor de corte). Matemáticamente:

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } X_i < \bar{X} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Las hipótesis a contrastar son

H_0 : La tendencia observada en el gráfico $\bar{X} - R$ es aleatoria

H_1 : La tendencia observada en el gráfico $\bar{X} - R$ no es aleatoria

La prueba que aquí se describe utiliza como estadístico de decisión el número total de rachas, que matemáticamente puede definirse por la siguiente formula

$$R = 1 + \sum_{i=1}^{n-2} Y_i$$

Bajo H_0 , los valores de R no deben ser excesivamente pequeños ni grandes, por lo que para un nivel de significancia α se rechaza H_0 si

$$R \leq r_{\alpha/2} \text{ o } R \geq r_{1-\alpha/2}$$

Los valores de r se encuentran tabulados para cada valor de α , para tamaños de muestra mayores a 20, R se puede aproximar a una distribución normal estándar.¹

Los resultados obtenidos mediante el uso de este software se presentan en el capítulo 11 análisis de resultados.

1. Sheskin, David (1996). Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures.

14. BIBLIOGRAFIA

Afanasieva, Natalia, Alvarez, Mario, Estudio del envejecimiento de los asfaltos colombianos bajo la acción de algunos factores climáticos

Bisquert, Juan. "Eficiencia de frenado y velocidad en una colisión". Universitat Jaume I, Castelló, Spain

Crespo del Rio, Ramón. "El Índice de Fricción Internacional (IFI) Obtención y Aplicaciones".

Calle Carmona, Juan Carlos. "Índice de seguridad vial- Revista Universidad EAFIT No 127- julio.agosto. Septiembre 2002."

Garber, Nicholas J. "Ingeniería de transito y carreteras".

Kraemer, Carlos. "Ingeniería de carreteras". Vol. II

Montejo Fonseca, Alfonso."Ingeniería de pavimentos: Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías" Tomo 2.

Roco H, Víctor. "Evaluación de la Resistencia al Deslizamiento en Pavimentos Chilenos".

Montgomery, Douglas C. Control Estadístico de la Calidad. 3 ed. México: Limusa Wiley, 2004.

Zuluaga Gómez, Hernando Arturo,Auscultación de daños de la estructura de pavimentos de la vía Caicedonia-Sevilla

S.A. Ingenieros Consultores, www.aepo.es

Bosch, Sistemas de frenado y electrónicos

http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_mecanica/fuerza_roz_unsam2k1.pdf

http://www2.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/33VictorRocoResistenciaDeslizamiento.pdf

http://www2.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/45RobinsonLuceroCoeficientedefriccion.pdf

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt170.pdf>

http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080111903/1080111903_02.pdf

<http://www.viaria.es/imgx/pdf/ac22bin5070scaliza-beriaain.pdf>

http://www.concretonline.com/pdf/SERVICIOS/04_calidad/art_tec/MarcadoCEMezclasBituminosas1.pdf

http://www.construnario.com/notiweb/tematicos_resultado.asp?id=261&informe=1