



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Métodos de medición de la textura de la carpeta asfáltica para hallar la
incidencia en el riesgo de accidentes

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Morales Minaya, Sergio Juan Carlos
ORCID: 0000-0002-0509-294X

Suyo Espinoza, Enrique
ORCID: 0000-0002-9107-8350

ASESOR

Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo
ORCID: 0000-0002-7722-8711

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos del autor(es)

Morales Minaya, Sergio Juan Carlos

DNI: 72645717

Suyo Espinoza, Enrique

DNI: 45008807

Datos de asesor

Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo

DNI: 10281360

Datos del jurado

JURADO 1

Donayre Córdova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

JURADO 2

Támara Rodríguez, Joaquín Samuel

DNI: 31615059

ORCID: 0000-0002-4568-9759

JURADO 3

Arévalo Lay, Víctor Eleuterio

DNI: 04434662

ORCID: 0000-0002-2518-8201

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis queridos padres Milagros y Fermín, mis abuelos, tíos, primos y aquellos que ya no están por haberme apoyado siempre; a mi mejor amiga Larissa y a mis amigos que gracias a sus consejos y conocimientos, me ayudaron y acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria, para así poder lograr este objetivo.

Morales Minaya, Sergio Juan Carlos.

Dedico esta tesis primero a Dios, quien supo guiarme correctamente; a mis padres Victoria y Néstor, que me apoyaron y confiaron plenamente en mi objetivo, a mis hermanos por su ejemplo a seguir, a mi abuela Donatilda que desde el cielo me da su bendición y a toda mi familia que supo apoyarme durante todo el proceso.

Suyo Espinoza, Enrique.

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a nuestro asesor M.Sc. Ing. Néstor Huamán Guerrero por el apoyo brindado para el desarrollo de nuestra tesis y por transmitirnos ese amor por la ingeniería vial. Al Mg. Ing. Víctor Arévalo Lay por brindarnos los conocimientos para nuestra investigación, y un especial agradecimiento a nuestro asesor Dr. Joaquín Támara Rodríguez por transmitirnos su pasión por la investigación científica.

Morales Minaya, Sergio Juan Carlos y Suyo Espinoza, Enrique.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 Formulación y delimitación del problema.....	1
1.1.1 Descripción del problema.....	1
1.1.2 Problema general.....	2
1.1.3 Problemas específicos	2
1.2 Objetivo general y específico	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Limitaciones del estudio	3
1.4 Importancia y justificación del estudio.....	3
1.4.1 Importancia.....	3
1.4.2 Justificación.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1 Antecedentes del estudio de la investigación	5
2.2 Investigaciones relacionadas.....	5
2.2.1 Investigaciones internacionales.....	5
2.2.2 Investigaciones nacionales	9
2.3 Estructura teórica	13
2.3.1 Pavimento asfáltico	13
2.3.2 Mezclas Asfálticas.....	15
2.3.3 Agregados para mezclas asfálticas	36
2.3.4 Ensayos de pulimento.....	43
2.3.5 Textura superficial del pavimento asfáltico	49
2.3.6 Microtextura	49
2.3.7 Macrotextura	50
2.3.8 Megatextura.....	51
2.3.9 Resistencia al deslizamiento.....	52
2.3.10 Índice de fricción internacional (IFI).....	54

2.3.11	Parámetros internacionales	55
2.3.12	Incidencia en el riesgo de accidentes	58
2.3.13	Hidroplaneo.....	62
2.3.14	Métodos de la medición de la textura con equipos de bajo rendimiento	69
2.3.15	Métodos de la medición de la textura con equipos de alto rendimiento	72
2.4	Definición de términos básicos.....	80
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS		82
3.1	Hipótesis	82
3.1.1	Hipótesis principal.....	82
3.1.2	Hipótesis específicas	82
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		83
4.1	Tipo y método de investigación.....	83
4.1.1	Método de investigación	83
4.1.2	Orientación de investigación	83
4.1.3	Enfoque de investigación	83
4.1.4	Recolección de datos	83
4.1.5	Tipo de la investigación	83
4.1.6	Nivel de la investigación	84
4.1.7	Diseño de la investigación.....	84
4.1.8	Población de estudio.....	84
4.1.9	Diseño muestral.....	84
4.2	Relación entre variables.....	84
4.2.1	Identificación de variables	84
4.2.2	Operacionalización de las variables	85
4.3	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	87
4.4	Procedimientos para la recolección de datos	87
4.5	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	87
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....		88
5.1	Diagnóstico y situación actual	88
5.1.1	Microtextura	89
5.1.2	Macrotextura	89
5.1.3	Contexto de Microtextura y Macrotextura	90

5.1.4 Zonas de medición de macrotextura, microtextura y fricción.....	91
5.1.5 Normativa para determinar el valor de Macrotextura	93
5.1.6 Ventajas y desventajas en la Macrotextura y Microtextura	95
5.1.7 Eventos de accidentes de tránsito por hidroplaneo en el Perú	96
5.2 Factores de incidencia en el Riesgo de accidente	98
5.2.1 Adherencia	99
5.2.2 Drenaje	100
5.3 Presentación de resultados	103
5.3.1 Interpretación de resultados de microtextura (TRRL vs. SCRIM)	103
5.3.2 Interpretación de resultados de macrotextura (Círculo de Arena vs. Texturómetro).....	105
5.3.3 Interpretación de resultados (Círculo de arena vs. Perfilómetro inercial)....	115
5.4 Análisis de resultados	123
5.4.1 Péndulo Británico vs SCRIM.....	123
5.4.2 Círculo de Arena vs Texturómetro.....	126
5.4.3 Círculo de Arena vs Perfilómetro Inercial	130
5.5 Contrastación de Hipótesis	134
5.5.1 Hipótesis Específica 1	134
5.5.2 Hipótesis Específica 2	135
5.5.3 Hipótesis Específica 3	136
CONCLUSIONES	137
RECOMENDACIONES	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
ANEXOS.....	143
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas	44
Tabla 2. Requisitos en valor de pulimento acelerado por sistema de riegos	45
Tabla 3. Combinaciones de microtextura y macrotextura	52
Tabla 4. Longitudes de onda asociadas a cada tipo de textura	52
Tabla 5. Valores mínimos coeficiente fricción con equipo SCRIM (Chile)	55
Tabla 6. Valores mínimos coeficiente fricción con péndulo TRRL (Chile).....	55
Tabla 7. Valores mínimo para macrotextura superficial (Chile)	56
Tabla 8. Rangos del coeficiente de fricción para la clasificación de los tramos	56
Tabla 9. Intervalos de la PMT para la clasificación de tramos (México).....	57
Tabla 10. Coeficiente de resistencia en el pliego de condiciones generales y particulares (España).....	57
Tabla 11. Rangos de fricción	71
Tabla 12. Operacionalización de variables	85
Tabla 13. Resultados macrotextura por círculo de arena en tramo Colibrí-Pintag (km 0+920 a 0+930)	116
Tabla 14. Resultados macrotextura por círculo de arena en tramo Colibrí-Pintag (km 3+330 a 3+340)	117
Tabla 15. Resultados del perfilómetro en tramo Colibrí-Pintag (0+920 a 0+930).....	118
Tabla 16. Resultados del perfilómetro en tramo Colibrí-Pintag (3+330 a 3+340).....	118
Tabla 17. Tipos de ecuaciones para ajuste de correlación.....	120
Tabla 18. PMTE del km 0+920 – 0+930 del tramo Colibrí-Pintag	121
Tabla 19. PMTE del km 3+330 – 3+340 del tramo Colibrí-Pintag	122
Tabla 20. Resultados del Círculo de arena y Texturómetro	126
Tabla 21. Error por operador en el ensayo del Círculo de Arena	127
Tabla 22. Tramo 1, para los dos distintos tamaños de microesfera.....	128
Tabla 23. Tramo 2, para los dos distintos tamaños de microesfera	129
Tabla 24. Resumen de resultados del Km 0+920 – 0+930	130
Tabla 25. Resumen de resultados del Km 3+330 – 3+340	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capas de un pavimento flexible.	13
Figura 2. Estructura de pavimento flexible.....	14
Figura 3. Cargas distribuidas en pavimento flexible.	15
Figura 4. Mezclas asfálticas.....	16
Figura 5. Mezcla asfáltica en finalización.	19
Figura 6. Pavimento en Mezcla asfáltica.	19
Figura 7. Primer plano de la mezcla asfáltica.....	19
Figura 8. Criterio de clasificación I.	20
Figura 9. Criterio de clasificación II.....	21
Figura 10. Características volumétricas de las probetas.	23
Figura 11. Rotura de las probetas.	23
Figura 12. Ensayo Marshall.....	24
Figura 13. Curva Densidad Marshall.....	25
Figura 14. Curva Estabilidad Marshall.....	25
Figura 15. Curva Deformación Marshall.....	26
Figura 16. Curva Porcentaje de huecos Mezcla Marshall.....	26
Figura 17. Curva Porcentaje de huecos áridos Marshall.....	27
Figura 18. Sistema Superpave	28
Figura 19. Ahuellamiento en pavimentos.....	30
Figura 20. Fisuración por fatiga.....	30
Figura 21. Fisuración térmica	31
Figura 22. Reómetro Dinámico de Corte.....	31
Figura 23. Viscosímetro Rotacional.....	32
Figura 24. Niveles de diseño para mezclas asfálticas.....	34
Figura 25. Grado de desempeño.....	35
Figura 26. Agregados para mezclas asfálticas.....	36
Figura 27. Agregados hidrofílicos e hidrofóbicos.....	37
Figura 28. Clasificación de agregados para mezclas asfálticas.....	38
Figura 29. Tipos de agregado para proporcionar textura al pavimento.....	39
Figura 30. Materiales muy duros (G1).....	40
Figura 31. Conglomeración de partículas pequeñas duras (G2).....	40
Figura 32. Agregados G3 y G4.....	41

Figura 33. Modelo generalizado del pulido del pavimento.	42
Figura 34. Modelo generalizado del pulido del pavimento.	43
Figura 35. Agregado grueso y fino.	45
Figura 36. Probetas elaboradas con el agregado de prueba.	46
Figura 37. Vista de las probetas en rueda de ensaye.	47
Figura 38. Componentes del equipo del pulimento acelerado.	47
Figura 39. Equipo para Pulimento acelerado.	48
Figura 40. Microtextura y macrotextura en pavimentos.	50
Figura 41. Fases de textura de la carpeta asfáltica.	51
Figura 42. Ubicación de la resistencia al deslizamiento	53
Figura 43. Parámetros del IFI.	54
Figura 44. Vehículo en pista mojada.	58
Figura 45. Neumático en pista mojada.	59
Figura 46. Distancia recorrida por perímetro de rueda.	60
Figura 47. Área de contacto neumático-pavimento.	60
Figura 48. Estándares de desempeño en pavimentos.	61
Figura 49. Hidroplaneo en pavimentos.	62
Figura 50. Hidroplaneo	63
Figura 51. H. Dinámico a baja velocidad.	64
Figura 52. H. Dinámico a velocidad media.	64
Figura 53. H. Dinámico a velocidad alta.	65
Figura 54. H. Viscoso.	66
Figura 55. H. Neumático Revertido.	67
Figura 56. H. Neumático Revertido.	68
Figura 57. Esquema del ensayo del círculo de arena.	70
Figura 58. Ensayo del círculo de arena.	70
Figura 59. Péndulo británico o TRRL.	71
Figura 60. Equipo Griptester.	73
Figura 61: Principales componentes del perfilómetro inercial	74
Figura 62. Segmento de 10 mm	74
Figura 63. Cálculo de PMP y PMTE.	75
Figura 64. Prototipo de texturómetro.	76
Figura 65. Equipo Mu-meter.	77

Figura 66. Equipo SCRIM.....	78
Figura 67. Equipo Walking Profiler G3.....	79
Figura 68. Walking Profiler G3 con tablet.	79
Figura 69. Posibles combinaciones de Macro y Microtextura.....	90
Figura 70. Contexto de Textura.	91
Figura 71. Zonas de medición.....	92
Figura 72. Tendencia de fallecidos en accidentes de tránsito en Perú (2011-2021).....	96
Figura 73. Accidente de tránsito Carretera Central.	97
Figura 74. Accidente de tránsito San Martín.	97
Figura 75. Accidente de tránsito en Vía de Evitamiento.	98
Figura 76. Factores de incidencia en el riesgo de accidentes.	98
Figura 77. Adherencia entre asfalto y neumático.	99
Figura 78. Posibles factores que influyen en la seguridad vial.	100
Figura 79. Pista mojada por lluvia.	102
Figura 80. Resultados de mediciones de coeficiente de fricción	103
Figura 81. Dirección de escaneo.....	106
Figura 82. Cálculo de la PMT para un punto escaneado	106
Figura 83. Propuesta de Algoritmo 1	107
Figura 84. Propuesta de Algoritmo 2.....	108
Figura 85. Propuesta de Algoritmo 3.....	108
Figura 86. Propuesta de Algoritmo 4.....	109
Figura 87. Propuesta de Algoritmo 5.....	110
Figura 88. Pruebas en campo con la técnica volumétrica.....	110
Figura 89. Pruebas en campo realizadas con el texturómetro.....	111
Figura 90. Relación PMP y Círculo de arena	111
Figura 91. Relación PMTE y Círculo de arena.....	112
Figura 92. Relación del Algoritmo 1 y Círculo de arena.....	112
Figura 93. Relación del Algoritmo 2 y Círculo de arena.....	113
Figura 94. Relación del Algoritmo 3 y Círculo de arena.....	113
Figura 95. Relación del Algoritmo 4 y Círculo de arena.....	114
Figura 96. Relación del Algoritmo 5 y Círculo de arena.....	114
Figura 97. Perfilómetro láser midiendo en mismo sitio que el ensayo volumétrico. ...	117
Figura 98. Relación MPD vs MTD.....	119

Figura 99. Ecuación polinómica de la relación MPD vs MTD	120
Figura 100. Control de coeficiente de fricción para pista 1 y 2.....	123
Figura 101. Valores referenciales de fricción.....	124
Figura 102. Control de CRD para pista 1 y 2	125
Figura 103. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial N° 1	131
Figura 104. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial N° 2	132
Figura 105. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial (PMTE) N° 1.....	132
Figura 106. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial (PMTE) N° 2.....	133

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro inercial con el fin de hallar la incidencia en el riesgo de accidentes.

El objetivo se alcanzó gracias a que se hizo el análisis de los resultados de las mediciones de la textura, especialmente de la microtextura y macrotextura de la carpeta asfáltica, que fueron recolectadas de tesis internacionales.

Logrando identificar los equipos de bajo rendimiento y alto rendimiento, ya que no trabajan de la misma manera y su toma de mediciones varían en cuanto a la velocidad y magnitud, para eso se realizó respectivas comparaciones entre dos equipos, uno de bajo rendimiento con uno de alto rendimiento.

Con la ayuda de este análisis de resultados que nos muestran los tesis en sus investigaciones hemos podido diferenciar las deficiencias que presentan los equipos de bajo rendimiento como el ensayo del círculo de arena y el péndulo británico TRRL frente a los equipos de alto rendimiento, siendo el más resaltante el del error del operador.

Por otro lado, se identificó los principales factores de incidencia en el riesgo de accidentes, los cuales son: la adherencia para la microtextura y el drenaje para la macrotextura, ya que cada uno de ellos tiene como consecuencia a la pérdida de fricción e hidroplaneo, respectivamente.

Palabras clave: Microtextura, macrotextura, adherencia, drenaje, hidroplaneo, fricción.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the texture of the asphalt layer by applying the British Pendulum or TRRL, Sand Circle, SCRIM, Texturometer based on artificial vision and Inertial Profilometer methods in order to find the incidence in the risk of accidents.

The objective was achieved thanks to the analysis of the results of the texture measurements, especially the microtexture and macrotexture of the asphalt layer, which were collected from international theses.

Being able to identify the low-performance and high-performance teams, since they do not work in the same way and their taking of measurements varies in terms of speed and magnitude, for that, respective comparisons were made between two teams, one of low performance with one of high performance.

With the help of this analysis of the results shown by the thesis students in their research, we have been able to differentiate the deficiencies presented by low-performance equipment such as the sand circle test and the TRRL British pendulum compared to high-performance equipment, being the most notable is operator error.

On the other hand, the main factors of incidence in the risk of accidents were identified, which are: adherence for the microtexture and drainage for the macrotexture, since each of them has as a consequence the loss of friction and hydroplaning, respectively.

Keywords: Microtexture, macrotexture, adherence, drainage, hydroplaning, friction.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las mediciones de la textura de la carpeta asfáltica se realizan según la norma MTC E 1005 para el ensayo del círculo de arena y su valor de macrotextura, y MTC E 1004 para el equipo del péndulo británico TRRL para valores de resistencia al deslizamiento, por lo cual es importante dar a conocer lo que la norma internacional actualmente pide, ya que nos invita ya a dejar de lado estos dispositivos y empezar a usar los distintos equipos de alto rendimiento que ya se usan en los demás países.

De ese modo se identifican a la adherencia como factor de incidencia de la microtextura y al drenaje para la macrotextura, ya que un valor elevado o muy bajo de estos conlleva a los accidentes de tránsito.

La diferencia entre un equipo de bajo rendimiento y alto rendimiento influye en la toma de mediciones, ya que el segundo abarca grandes redes y no son puntuales, además ya no son estáticos sino dinámicos, y esto ayuda a la velocidad de evaluación de tramos, contribuyendo también a la no interrupción del tráfico.

De esta manera, la presente investigación se enfoca en el análisis de los resultados obtenidos de valores de macrotextura y fricción con los equipos de bajo rendimiento y alto rendimiento para hallar su incidencia en el riesgo de accidentes.

Esta investigación es presentada mediante 5 capítulos: El capítulo I aborda el planteamiento del problema, donde se muestra la formulación del problema general y específicos, así como también los objetivos. A su vez se describe la delimitación del problema, la justificación y finalmente la importancia de la investigación.

Problema general: ¿En qué medida los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial, de la medición de la textura de la carpeta asfáltica, tienen incidencia en el riesgo de accidentes?

Objetivo general: Determinar la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro inercial, para hallar la incidencia en el riesgo de accidentes, año 2022.

En capítulo II se presenta el marco teórico donde se hace énfasis sobre los antecedentes nacionales e internacionales de nuestro tema de investigación para lograr un conocimiento más amplio.

En capítulo III se muestra la hipótesis principal y específicas, así como también la descripción conceptual de cada variable de la presente investigación.

Hipótesis principal: Determinando la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro inercial, se halla la incidencia en el riesgo de accidentes.

En el capítulo IV se plantea el método de la investigación deductiva donde a conocer el tipo, donde concluimos que la investigación tiene enfoque cuantitativo y el diseño de la investigación realizada es no experimental, transversal y retrospectiva. Se identifica la población de estudio y la muestra. Finalmente se muestra las técnicas e instrumentos de recolección de datos donde empleamos la técnica documental debido a que la información se obtuvo de fuentes secundarias.

En capítulo V se presentan los resultados de mediciones de la textura de la carpeta asfáltica de tesis internacionales con los ensayos del Círculo de Arena, Péndulo Británico TRRL, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial, para posteriormente ser analizados los valores arrojados por estos equipos y compararlos entre sí; en la contrastación de la hipótesis mostramos la comparación del valor de macrotextura y fricción con equipos de bajo rendimiento con alto rendimiento y su incidencia en el riesgo de accidentes.

Finalmente se realiza las conclusiones, recomendaciones y los anexos donde se muestra la matriz de consistencia. La tesis está siendo investigada para obtener el grado de Ingeniero Civil a nombre de la Nación en la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Ricardo Palma.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Formulación y delimitación del problema

1.1.1 Descripción del problema

En la gran mayoría de los países del mundo la seguridad vial siempre es un tema muy importante para tener en cuenta, es por eso que no solo se resalta las señalizaciones, personal de orientación, etc., sino que también es importante la comodidad y más aún la seguridad que deben brindar los pavimentos por donde circulan los vehículos y así poder disminuir el riesgo de accidentes, ya que el pavimento en su última capa construida, es decir, la carpeta asfáltica, presenta fases en su textura, de las cuales sus dos primeras fases en sus óptimas condiciones nos brindarán la seguridad deseada para los usuarios.

Para eso existen métodos y equipos para las mediciones de estos valores de la textura, métodos que son reconocidos a nivel nacional e internacional puesto que son los referentes para estos cálculos, pero también a lo largo del tiempo algunos de ellos ya van quedando desfasados, ya sea porque son estáticos y no dinámicos que es lo que se busca generalmente, por ejemplo, no debería de haber interrupciones del tráfico, equipos que trabajen bajo pavimento húmedo, o que sus mediciones no sean puntuales (se realizan en un solo punto del pavimento) sino que abarque grandes tramos o redes.

Con estas nuevas características de los métodos para hallar la textura en la carpeta asfáltica, nos ayudará a que los resultados de las mediciones sean más rápidos, y así con estos índices poder hallar la incidencia en el riesgo de accidentes, porque una superficie de rodadura en mal estado o deteriorado con el tiempo conlleva a muchos accidentes de tránsito.

En la actualidad existen muchos métodos que se van innovando, pero que algunos solo quedan como pruebas o no son suficientes para suplir a los ya conocidos mundialmente, entonces por lo cual surge la siguiente pregunta de investigación: ¿En qué medida los métodos de medición de la textura de la carpeta asfáltica inciden en el riesgo de accidentes?

1.1.2 Problema general

¿En qué medida los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial, de la medición de la textura de la carpeta asfáltica, tienen incidencia en el riesgo de accidentes?

1.1.3 Problemas específicos

- a) ¿De qué manera la microtextura de la carpeta asfáltica, hallada con los métodos de medición de bajo rendimiento (Péndulo Británico o TRRL) y alto rendimiento (SCRIM), incide en el riesgo de accidentes?
- b) ¿De qué manera la macrotextura de la carpeta asfáltica, hallada con los métodos de medición de bajo rendimiento (Círculo de Arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), incide en el riesgo de accidentes?
- c) ¿En qué medida con la textura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición incide en el riesgo de accidentes?

1.2 Objetivo general y específico

1.2.1 Objetivo general

Determinar la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro inercial, para hallar la incidencia en el riesgo de accidentes, año 2022.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analizar la microtextura de la carpeta asfáltica con los métodos de medición de bajo rendimiento (Péndulo Británico o TRRL) y alto rendimiento (SCRIM), que inciden en el riesgo de accidentes.
- b) Analizar la macrotextura de la carpeta asfáltica con los métodos de medición de bajo rendimiento (Círculo de Arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), que inciden en el riesgo de accidentes.
- c) Determinar la incidencia en el riesgo de accidente con la textura hallada según los métodos de medición.

1.3 Limitaciones del estudio

Se encontró limitaciones en cuanto al registro de la data de accidentes vehiculares específicamente por hidroplaneo, ya que solo se encontró datos de accidentes de manera general.

Además, se encontró limitaciones en cuanto a las nuevas innovaciones de métodos de medición de la textura, ya que algunos son mencionados y no hay acceso a sus metodologías.

1.4 Importancia y justificación del estudio

1.4.1 Importancia

Cuando nosotros hablamos de seguridad vial se involucra la señalización, las barreras, los delineadores, la altura, etc., es decir todos los elementos que en gran parte contribuyen a que la circulación del tránsito se desarrolle de la forma más segura posible y que garantice un buen funcionamiento en la circulación de los vehículos.

Pero al analizar todo esto hay un parámetro que pocas veces es considerado y es muy importante, el cual es los pavimentos ya que es por el cual se va a dar la rodadura de los vehículos.

Los pavimentos cumplen dos funciones: aspecto estructural y el aspecto funcional, dentro de la característica funcional y es lo que nos importara en esta investigación ya que va relacionado con la circulación de los vehículos. Entonces dentro de ese aporte encontramos dos partes funcionales: la serviciabilidad que está dada por la regularidad superficial y la seguridad que básicamente está relacionada con dos parámetros: la textura y la resistencia al deslizamiento.

1.4.2 Justificación

Entonces para garantizar una buena seguridad a los usuarios es necesario analizar la textura de la carpeta asfáltica, es decir, por donde rueda el vehículo. Y de esta manera específica se debe medir la macrotextura y microtextura y estos a su vez están relacionados con la resistencia al deslizamiento.

Estos parámetros de microtextura y macrotextura están relacionados con la adherencia y drenaje respectivamente, y al ser asegurados nos darán una buena resistencia al deslizamiento y así pueda evitarse el hidroplaneo.

Este hidroplaneo es cuando la rueda del vehículo no está actuando directamente sobre la superficie del pavimento, sino que está sobre una película de agua, esto hará que no se asiente directamente sobre la carpeta asfáltica.

Por lo que es necesario los métodos de medición que existen para estos parámetros tan importantes de la textura de la carpeta asfáltica, y de esta manera poder hallar la incidencia en el riesgo de accidentes.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio de la investigación

Como sabemos la construcción de pavimentos en el Perú, especialmente los pavimentos flexibles, son los más realizados en las ciudades de nuestro país, ya que a través de estas construcciones se pueden conectar las personas, es por eso que nos debe de importar la textura que deben tener los pavimentos en su acabado final, en su parte superficial, ya que una carpeta asfáltica muy lisa, con una textura superficial muy lisa, definitivamente conlleva a la posibilidad de accidentes de tránsito, entonces existe la preocupación que cuando nosotros construyamos las pistas tengan la textura tanto a través de la macrotextura y microtextura que definitivamente correspondan a un pavimento que nos dé la seguridad cuando los vehículos circulen por ahí y esto evitará definitivamente muchas muertes a través de los accidentes de tránsito, por ello es importante que en nuestros proyectos y en nuestros procesos constructivos nos aseguremos que esta superficie de la carpeta asfáltica tenga una textura y a su vez un coeficiente de fricción suficiente que permita el agarre de ese neumático-pavimento aun así estando la pista mojada, por ello es que este tema es de vital importancia para todos nosotros y más aún para aquellos que nos dedicamos al diseño y a la construcción de los pavimentos asfálticos (Huamán, 2021).

2.2 Investigaciones relacionadas

2.2.1 Investigaciones internacionales

Fleites, L. (2017) en su tesis titulada: “Resistencia al deslizamiento y textura superficial en pavimentos flexibles en la carretera rural Santa Clara - Manicaragua” donde tiene como objetivo “determinar la resistencia al deslizamiento y textura superficial en pavimentos flexibles”. En los cuales se obtuvo de toda la evaluación realizada en la carretera Santa Clara, Manicaragua con el péndulo británico para determinar el CDR “coeficiente de resistencia al deslizamiento” un promedio de 0.4407 clasificando al pavimento en mal estado, de igual manera se hizo del círculo de arena en el que se obtuvo un promedio de 0.254 mm en la macrotextura. Al determinar estas dos caracterizaciones del pavimento, se demostró la influencia de la carpeta de

rodadura del pavimento en la adherencia neumático-pavimento con condiciones inseguras y de peligro de circulación, con una limitación en la velocidad lo que necesita actividad de conservación, donde las conclusiones fueron, se demostró la interacción de los efectos de la clasificación de la macrotextura de un pavimento y el CDR (coeficiente de deslizamiento) en la carretera Manicaragua con la Circunvalación Sur del Municipio de Santa Clara en el puente de la Autopista Nacional en un estado malo.

Sornoza, Y. (2019) en su tesis titulada: “Evaluación de las condiciones de seguridad y comodidad de la capa de rodadura de la avenida de los choferes (km 1+044.62)” donde se tiene como objetivo, ejecutar la evaluación de la av. de los choferes en la ciudad de Jipijapa con los ensayos de rodadura y tener resultados con normas vigente, además de caracterizarlos realizando mediciones de rugosidad y evaluar el IFI “Índice de Fricción Internacional” se obtuvo los siguientes resultados de los ensayos para determinar el índice de rugosidad (IRI), CDR “coeficiente de resistencia al deslizamiento” y la macrotextura, siendo los resultados para la rugosidad el valor de 8.36 m/km lo cual nos indica que se encuentra en una condición muy pobre ya que debería ser menor de 5.5 m/km, el péndulo británico nos da un valor de 0.53 de coeficiente de resistencia al deslizamiento el cual nos dice que es de un valor más o menos espeso donde se clasifica como regular a bueno y para el círculo de arena 0.58 mm en la macrotextura. De acuerdo con la presente tesis se obtuvo como resultado para el pavimento tomado de muestra, en cuanto al IRI un valor de 7.249 m/km y un coeficiente de resistencia al deslizamiento 0.46, en la macrotextura un valor de 1.63 mm y en el círculo de arena los cuáles cumplían mínimamente con lo requerido antes de la aplicación de los mantenimientos. Concluyendo que la vía se encuentra en un estado regular en cuanto al IRI afectando la comodidad de la circulación del usuario, siendo un factor de alerta para su rehabilitación y mantenimiento. En cuanto al IFI en base al MTOP, que la calidad de los agregados utilizados en la vía no fueron los adecuados para una buena adherencia de neumático-pavimento.

Rivas, M. (2017) en su tesis titulada: “Evaluación de la textura y la rugosidad de pavimentos flexibles mediante imágenes tomadas a partir de cámara no métrica Nikon Coolpix S2900” donde se tiene como objetivo, analizar la rugosidad y la textura de los pavimentos flexibles, por el cual van a emplear un procesamiento digital de imágenes que serán tomadas por una cámara métrica Nikon S2900. De esta manera se van a correlacionar las mediciones usando equipos típicos que son usados en la ingeniería de pavimentos, con las adquiridas mediante la cámara fotográfica. Concluyó que, al realizar la comprobación conseguida en laboratorio con las áreas calculadas mediante el procesamiento de las imágenes, no se lograron resultados de asociación entre las variables analizadas, por lo que se considera, que mediante fotografías convencionales no es factible analizar la textura y la rugosidad en un pavimento flexible. Si bien las imágenes resultaron bien clasificadas, no se puede pasar por alto que si tienen en cuenta solo tres bandas (R, G, B), puede que existan niveles digitales que se desconcierte con otros, por lo que se presentan algunos datos atípicos en los resultados. Aclara que se debe calcular otra variable que acepte analizar con tres ejes x, y, z y de esta manera, a través de un perfil de briqueta, conseguir longitudes de onda para el análisis de la microtextura y macrotextura. Propone una metodología donde se pueda efectuar perfiles longitudinales en las briquetas y así originar nuevamente la correlación con los datos adquiridos a partir del laboratorio.

Ipiates, E. (2019) en su tesis titulada: “Estudio de la capa de rodadura de pavimento flexible en los accesos principales de Jipijapa” explica que, durante su investigación, identificaron errores en la textura de la carpeta asfáltica, con un drenaje escaso para evacuar las aguas que están sobre la capa de rodadura. A través de ensayos se verificó el estado de la textura superficial donde se hallan los tres accesos principales a Jipijapa. A partir de los resultados se identificaron coeficientes de resistencia al deslizamiento con índices muy inferiores los cuales producirán una progresiva distancia mínima de frenado, siendo peligroso transitar por estas vías, además si el pavimento está mojado, se produciría el fenómeno del hidropneumático, en caso de que el vehículo sobrepase los 50 km/h.

Los resultados de la altura de macrotextura en los tres accesos principales de Jipijapa, manifiestan el mal cuidado de estas obras, los resultados promedios rondan en valores menores a lo mínimo solicitado para cumplir con una buena macrotextura, incrementando el riesgo de accidentes de tránsito en los accesos viales estudiados.

Lua, E. (2014) en su tesis “Estudio de la resistencia al deslizamiento en capas de rodadura mediante la evaluación del índice de fricción internacional (IFI), caso Michoacán” explica que las capas de rodadura de un pavimento se les exige una buena calidad y durabilidad. Con nuevos avances tecnológicos, los usuarios de las carreteras en los países industrializados demandan una superficie de rodadura con una buena resistencia al deslizamiento en condiciones de pavimento mojado y a una alta velocidad. En México, se ha venido identificando el pavimento por el valor de un solo coeficiente de fricción, hallado mediante equipos y/o ensayos, mejor o peor adaptados a condiciones actuales de la circulación y de los pavimentos, es decir no se considera la medición de otros parámetros como la textura. El diseño de un pavimento debe ser hecho para seguridad y comodidad del usuario, en México estas dos características se miden por medio de dos parámetros: el índice de perfil es una medida hasta cierto punto de la comodidad al circular por un pavimento y en lo que concierne a la seguridad de la carretera se requiere únicamente el coeficiente de fricción medido con el mu-meter, sin embargo y de acuerdo a estudios internacionales realizados (PIARC) tener un solo valor de fricción no es distintivo del estado superficial de una carretera, por lo que es necesario la medición de la textura para tener verdaderamente un parámetro de se relacione con la seguridad en la vía. En los tramos estudiados del estado de Michoacán, aunque el coeficiente de fricción conseguido con el mu-meter cumplía con la norma de la SCT, al obtener valores de textura y correlacionarlos a través de IFI se determinó que algunos tramos presentaban inconvenientes con la resistencia a la fricción, lo cual se manifiesta en las curvas características de la fricción que se obtuvieron. Así mismo, teniendo en cuenta los valores mínimos admisibles por la SCT se pudo elaborar una gráfica de control de todos los tramos trabajados, de esta gráfica se pueden recomendar

con respecto al coeficiente de rozamiento obtenido con el mu-meter, que es importante comprobar la velocidad de operación ya que la velocidad aconsejada internacionalmente es de 60 km/h. De igual modo la medición del parámetro tiene que realizarse después de dos meses de puesta en operación y antes del año. Esto con el propósito de que el asfalto que envuelve a los agregados de la superficie haya podido disminuir y se pueda medir la verdadera resistencia a la fricción de los agregados.

2.2.2 Investigaciones nacionales

Mundaca, J. (2019) en su investigación “Evaluación del coeficiente de fricción del pavimento en 10 vías rápidas en Arequipa usando el péndulo de fricción británico TRRL” planteó como objetivo desarrollar toda la metodología experimental para conocer el coeficiente de fricción de las diez vías a evaluar, todo eso enfocado a la seguridad vial. Se realizó una cuantificación de la relación entre las medidas de la microtextura y la macrotextura tomadas en campo. Se determinó si es que puede cumplir con los parámetros mínimos de CRD y MTD y así poder determinar el Índice de Fricción Internacional (IFI). Así como también se planteó como objetivo específico el determinar y analizar la resistencia al deslizamiento con en el Péndulo de Fricción Británico TRRL y medir la macrotextura superficial por el método del círculo de arena en 10 vías rápidas en Arequipa para finalmente obtener el IFI. Obteniendo como resultados, que el 80% de las vías evaluadas (8 de 10 vías) requiere un mantenimiento superficial para mejorar la microtextura y macrotextura superficial del pavimento y que solo dos vías cumplen con el IFI las cuales son Avenida Parra y Avenida Alfonso Ugarte. También se concluyó que nueve de las diez vías evaluadas cumplen con un CRD mayor o igual a 0.45 y solo la Av. Aviación presenta un CRD = 0.42 por debajo del mínimo, ambos fueron medidos con el Péndulo Británico. Y ocho de las diez vías evaluadas cuentan con una profundidad de textura media (PMT) menor a 0.70m lo cual ocasiona que cuando estas se encuentren en condiciones húmedas y a elevadas velocidades aumenta el riesgo de perder el control del vehículo debido al Hidroplaneo. También se concluyó que una adecuada Microtextura ayuda a una

buena adherencia superficial a bajas velocidades (menores a 30 Km/h en promedio de las 10 vías evaluadas), pero a velocidades mayores a 30 Km/h, se necesita también una adecuada macrotextura sobre todo en condiciones de contaminación. Y no se puede aseverar que las características y propiedades superficiales sean las únicas causas de accidentes de tránsito o atropello, pues también depende de otros factores como el desgaste del neumático, la habilidad del conductor, condiciones climatológicas, pero si es un factor que puede acrecentar los riesgos en la seguridad vial.

Ramirez, M. (2017) en su investigación “Comportamiento del slurry seal a altitudes mayores de 3500 m.s.n.m. en mantenimiento de pavimentos flexibles de la ciudad de Puno” donde planteo como objetivo, interpretar la conducta del slurry seal a alturas por encima de los 3500 m.s.n.m. en el mantenimiento mediante la utilización de emulsiones asfálticas que mejore la textura superficial del pavimento flexible. Ya que es una de las técnicas utilizadas a nivel mundial para su conservación, permitiendo alargar la vida útil y siendo aplicada en superficies que tengan un nivel muy avanzado de deterioro. Obteniendo como resultado que la conducta del slurry seal por encima de los 3500m.s.n.m. para mantenimientos de vías asfaltadas es una alternativa eficaz la cual mejora la serviciabilidad de las vías de la ciudad de Puno. La aplicación del slurry seal mejoro la resistencia al deslizamiento obteniendo valores del coeficiente como resistencia al deslizamiento mayores a 0.73 siendo el mínimo 0.45 especificada en el manual de “especificaciones técnicas EG 2013”, resultando tener una buena fricción entre la carpeta de rodadura y el neumático, esta indica que hay una buena resistencia al deslizamiento y buena textura superficial. Este tipo de mantenimiento de pavimentos flexibles es rentable con significativos beneficios, corrigiendo ahuellamientos y micro fisuras del pavimento.

Rivera, C. (2017) en sus tesis titulada: “Evaluación del tratamiento superficial bicapa a nivel de ejecución, de la obra mejoramiento de la ruta AM-100, Bagua La Peca; del circuito vial II-Amazonas” nos plantea como objetivo evaluar los tratamientos superficiales bicapas en la ruta AM-100, BABUA EL PARCO, contrastando con el expediente técnico, obteniendo como resultados de la aplicación y análisis del tratamiento superficial bicapa, los siguientes resultados, como coeficiente de resistencia al deslizamiento obtuvo un 0.45 utilizando el ensayo del péndulo británico (TRRL) y como resultado del índice de rugosidad internacional 2.25 m/km (IRI) y a través del círculo de arena un valor para la macrotextura de 1.2 mm todos estos cumpliendo con los requerimientos en la norma. Concluyendo que se cumplió con los parámetros establecidos para el proceso y recopilación de información que se usaron en la investigación.

Guerreros, S. (2020) en su tesis denominada “Influencia del Agregado y del %Asfalto para la Recuperación de la Textura de Pavimentos Flexibles”, indica que la textura superficial de un pavimento flexible es un rasgo muy importante a la hora de evaluar la calidad de pavimentos, pero que la mayoría de las veces no se le da la importancia que se debe. La textura debe estar dentro de un rango aceptable hacia arriba y hacia abajo, pues un valor muy bajo significa que la superficie es muy lisa y puede afectar los valores de coeficiente de rozamiento. En cambio, una superficie con valores muy altos será una superficie muy rugosa que generará un desgaste considerable de los neumáticos. Unos valores no deseados de la textura se generan por factores como: mal proceso constructivo, mala calidad de los materiales, procesos de erosión no previstos, clima y/o tráfico. Sin embargo, se puede reparar la textura, aplicando coberturas con el slurry seal que mediante devolver a la carpeta asfáltica una textura adecuada. En esta investigación se logró demostrar que con una mezcla adecuada entre la granulometría del agregado y % asfalto del slurry seal, sí se puede recuperar la textura superficial de pavimentos deteriorados, y este se puede verificar por el método del círculo de arena ya que estamos midiendo la mejor macrotextura para no generar el fenómeno de hidropilano.

Morante, H. (2019) en su tesis titulada “Pavimento flexible con tratamiento superficial para aeródromo de tráfico ligero” tiene como objetivo hacer comprobaciones de las etapas de diseño, construcción y control de calidad del pavimento flexible y del tratamiento superficial del aeródromo de Huancabamba. Existen diversos métodos de diseño de pavimentos desarrollados los últimos años por países como Estados Unidos y Reino Unido, además estos países han realizado normas reglamentarias y especificaciones técnicas para la construcción y el control de calidad de sus pavimentos. En cambio, el Perú no tiene un manual de construcción ni con un método de diseño de pavimentos aeroportuarios.

En la investigación se pudo llegar a la conclusión de que el diseño del pavimento flexible aeroportuario, hecho con la metodología del Reino Unido, resultó técnicamente bien sustentado, ya que cumplió con los requisitos mínimos internacionales de espesores de pavimentos aeroportuarios. Con respecto al tratamiento superficial tricapa fue técnicamente bien diseñado, ya que, al contrastar las dosificaciones aplicadas en el proyecto, desarrolladas por la metodología de McLeod, se hallaron valores de dosificación de agregado pétreo y ligante bituminoso parecidos. Además, el agregado pétreo y el ligante asfálticos empleados fueron materiales de calidad aprobada, al cumplir con los requerimientos exigidos por el Manual de Carreteras EG-2013. También se procedió a medir la macrotextura mediante el ensayo de círculo de arena, donde se obtuvo un promedio aproximado de 1.34 mm, con lo cual se considera un valor aceptable dentro del rango estipulado.

2.3 Estructura teórica

2.3.1 Pavimento asfáltico

Es una estructura que está constituida por capas granulares (subbase y base) y como carpeta de rodadura una capa compuesta con: agregados (finos y/o gruesos), filler y ligante asfálticos. Se considera como carpeta de rodadura asfáltica como capas granulares: mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micropavimentos, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente. (MTC, 2018)

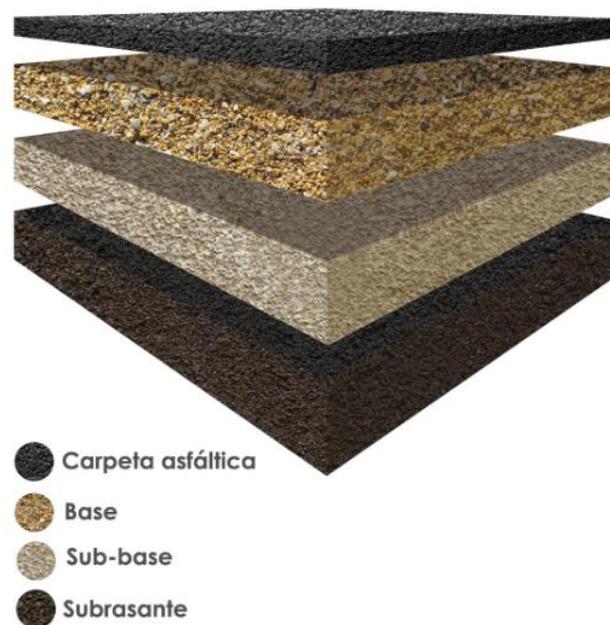


Figura 1. Capas de un pavimento flexible.

Fuente: Luis Guillermo Loría Salazar, 2019.

a) Carpeta Asfáltica

La carpeta asfáltica es aquella capa que se encuentra en la zona superior de la estructura del pavimento flexible, se localiza por encima de la base, y es la que le aporta la superficie de rodamiento a la vía, como también realiza la función de impermeabilizar la superficie previniendo el ingreso de agua que sería capaz de saturar las capas inferiores, además de eso previene la separación y ayuda a las demás capas a tolerar las cargas y repartir los esfuerzos, pero es la capa que se encuentra más expuesta a los daños, así

como a los efectos de cargar que debe soportar de los vehículos, por lo que se va a necesitar que se realicen mantenimientos periódicos para avalar su adecuado funcionamiento (Rodríguez, 2009).



Figura 2. Estructura de pavimento flexible.

Fuente: Pavimento Flexible, Construneic, 2022.

b) Base

Es la capa inferior a la carpeta asfáltica, la cual tiene como vital función de sostener, distribuir y transmitir las cargas causadas por el tránsito. Esta capa estará compuesta de material granular drenante ($CBR \geq 80\%$) o será tratada con asfalto, cal o cemento. (MTC, 2018)

c) Subbase

Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual va a soportar a la base y a la carpeta asfáltica. Además, funciona como capa de drenaje y controlador de capilaridad del agua. Esta capa puede llegar a obviarse dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento. Esta capa puede ser de material granular ($CBR \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento. (MTC, 2018)

Para poder decir que un pavimento está bien diseñado, las cargas verticales ocasionadas por el tránsito deben llegar a la subrasante con valor nulo, es decir, cero.

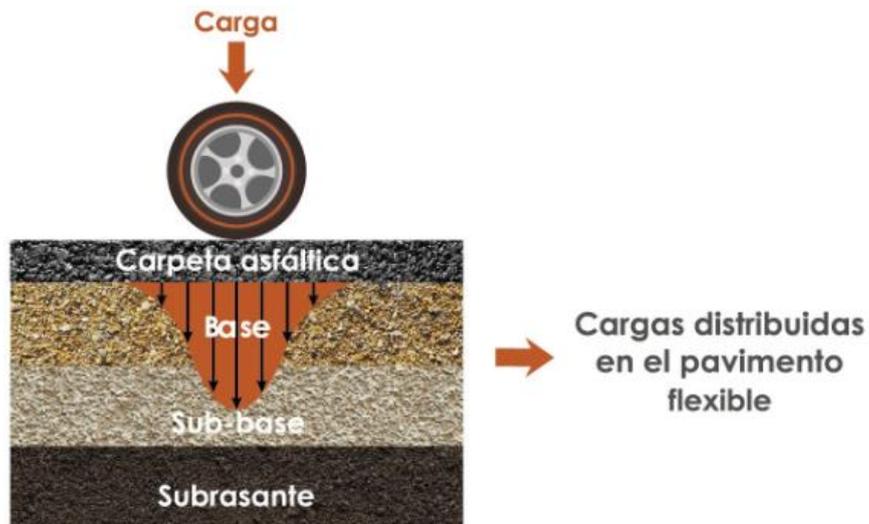


Figura 3. Cargas distribuidas en pavimento flexible.

Fuente: Luis Guillermo Loría Salazar, 2019.

2.3.2 Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas son también llamadas aglomerantes asfálticos o simplemente aglomerados y es una agrupación de agregados con una granulometría cualquiera, cuyas partículas están totalmente envueltas por un ligante hidrocarbonado, pero además por la importancia que tiene como veremos luego en el comportamiento de la mezcla asfáltica, de la parte mineral del agregado consideramos separadamente lo que se denomina polvo mineral o fíller, en definitiva vemos que una mezcla asfáltica tendría 3 componentes: Agregado, Fíller y ligante, sin embargo incluso para la mayor parte de las mezclas podemos considerar un cuarto componente que son los huecos o vacíos que quedan en ella tras la compactación, al contrario con lo que ocurre con otros materiales en los que se busca llegar a la máxima compacidad a una ausencia prácticamente total de huecos o vacíos, en la mayor parte de las mezclas asfálticas interesa que tras la compactación quede una proporción aunque sea pequeña de huecos para que la mezcla tenga un buen comportamiento en todas las condiciones de trabajo (Del val, 2020).

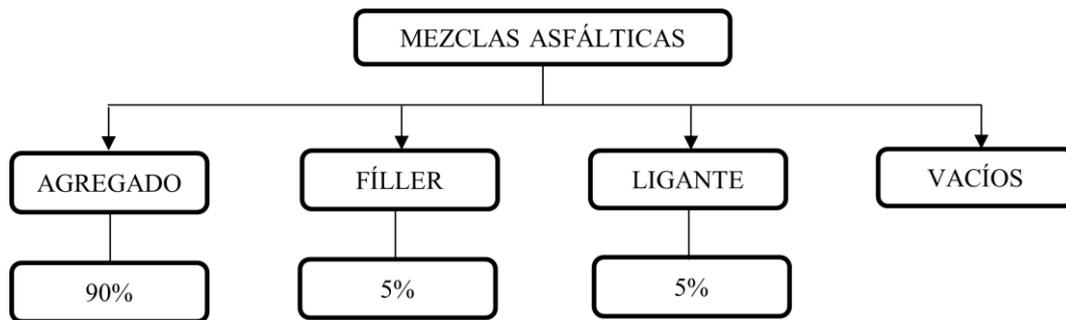


Figura 4. Mezclas asfálticas.

Fuente: Elaboración propia.

Estos componentes de las mezclas asfálticas son muy importantes puesto que esto nos asegurara el correcto funcionamiento del pavimento y la carencia de calidad de en alguno de ellos perjudica al grupo.

Entonces la mezcla asfáltica es la que está conformando nuestro paquete estructural y cuando se compacta debidamente pasa a ser la carpeta de rodadura del pavimento, entonces si nosotros requerimos conocer efectivamente cuáles son las condiciones que debe tener la carpeta asfáltica, por eso es importante conocer cómo está constituido, es decir, qué materiales componen la mezcla asfáltica: agregado grueso, agregado fino, filler , así como también dependerá del tipo de mezcla asfáltica que se realizará.

a) Asfalto

Se define como una mezcla compleja de hidrocarburos y es el último producto en el proceso de la destilación fragmentada del petróleo. El asfalto, en una primera instancia, es líquido cuando es sometido a altas temperaturas y al estar en este estado permite que se pueda mezclar con agregados pétreos y obtengamos mezclas asfálticas con un gran desempeño, así como también tiene la característica de que a temperatura ambiente es semisólida, entonces estas características que tiene el asfalto de cambiar de estado tan conveniente es lo que lo hace principalmente sea un material muy utilizado en vías (Geotecnia Aplicada, 2021).

También es importante saber que el asfalto es muy determinante dentro de la durabilidad de un pavimento, básicamente por las debilidades que presenta el asfalto, tales como la: susceptibilidad térmica que funciona mal a altas temperaturas, deformaciones plásticas o algunas fallas como la exudación, por esa razón la importancia de nosotros como ingenieros, es que tengamos ciertos conceptos de que efectivamente se está utilizando el asfalto o ligante asfáltico adecuado.

b) Ligantes Asfálticos

Hay diferentes tipos de ligantes asfálticos que se tiene en el mercado, así como también para qué son utilizados:

- CAP

El CAP viene a ser el Cemento Asfáltico de Petróleo o asfalto residual, el cual se obtiene de la destilación del petróleo (del crudo), y son los que sirven para la fabricación de Mezclas Asfálticas en Caliente y Mezclas Asfálticas en tibio.

- Asfaltos diluidos, recortados o cut-backs

Es el que se sigue usando en el Perú en un 98% y tenemos a los RC, MC, LC, se les denomina recortados o Cut Backs porque dentro de su constitución tienen diluidos, por ejemplo, el RC es un CAP + gasolina, un MC es un CAP + kerosene y LC es un CAP + diésel. Estos diluidos son muy dañinos para la salud de las personas y para el medio ambiente ya que solo cumplen la función de transporte o vehículo para que el CAP penetre, luego de eso se volatiliza. Este tipo de ligantes asfálticos ya no se usan en el mundo hace mucho tiempo (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

- Emulsión asfáltica

Es un ligante asfáltico que se puede usar sin problemas, ya que se mezcla con agua. La emulsión asfáltica es una mezcla del CAP + agua a través de un aditivo químico muy potente que hace posible esta mezcla, ya que como sabemos el asfalto es bastante viscoso, entonces lo que hace el aditivo es

destrozar al asfalto convirtiéndolo en miles de gotas pequeñas y así pierde peso molecular, por ende, su viscosidad, lo que hará bastante fácil que se mezcle con el agua, esta emulsión asfáltica es usada para las mezclas asfálticas en frío (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

- Asfaltos modificados con polímeros o caucho

Este tipo de ligante asfáltico está bastante difundido en muchos lugares como conferencias nacionales e internacionales, entrevistas, etc. Es un ligante asfáltico en el cual se le incorpora un polímero o de hule molido de neumáticos, ya que son sustancias que se mantienen estables en el tiempo y a variaciones de temperatura el cual son agregados al asfalto para modificar sus propiedades reológicas y físicas y de esta manera disminuir la susceptibilidad térmica, la humedad y la oxidación (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

- Asfaltos espumados

Este tipo de Ligante asfáltico es usado mayormente para la estabilización de bases granulares, para micropavimentos, el cual se obtienen también a partir de una mezcla entre el asfalto y el agua. Cuando el asfalto está muy caliente (se eleva a 180° a 200°) para luego inyectarle agua a temperaturas normales, entonces se produce una explosión casi al contacto por la diferencia de temperaturas generándose una espuma (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

c) Filler

El filler o polvo mineral, tiene como función complementar la granulometría de los agregados finos cuando estas no cumplen las especificaciones técnicas dadas. Tenemos en este caso a la cal hidratada, cemento portland, polvo de roca, polvo de escoria, ceniza fina o loes.

En cuanto a la norma que deben cumplir estos materiales se tiene a la norma AASHTO-M303 para el caso de la cal hidratada, pero para los demás materiales mencionados anteriormente deben cumplir la norma ASTM D-242 (MTC, 2015).



Figura 5. Mezcla asfáltica en finalización.
Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.



Figura 6. Pavimento en Mezcla asfáltica.
Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.



Figura 7. Primer plano de la mezcla asfáltica.
Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

En la Fig. 5 podemos apreciar una mezcla asfáltica que se está terminando de colocar, en la Fig. 6 podemos ver un pavimento de mezcla asfáltica que ya lleva un tiempo en servicio y en la Fig. 7 podemos apreciar un primer plano de la mezcla asfáltica, donde podemos deducir de esta imagen que no lleva demasiado tiempo en servicio, porque es ahora cuando los agregados superficiales empiezan a mostrar su cara debido a que los neumáticos han eliminado la película superficial del ligante, que es lo que tiene que ocurrir finalmente para que la mezcla tenga una característica funcional tan importante como es la resistencia al deslizamiento.

Clasificación de Mezclas Asfálticas

Hay una gran variedad de tipos de clasificación de las mezclas asfálticas, para eso hay que tener en cuenta que puede haber materiales de muy diversas características, por eso es necesario recurrir a diversos tipos de clasificación.

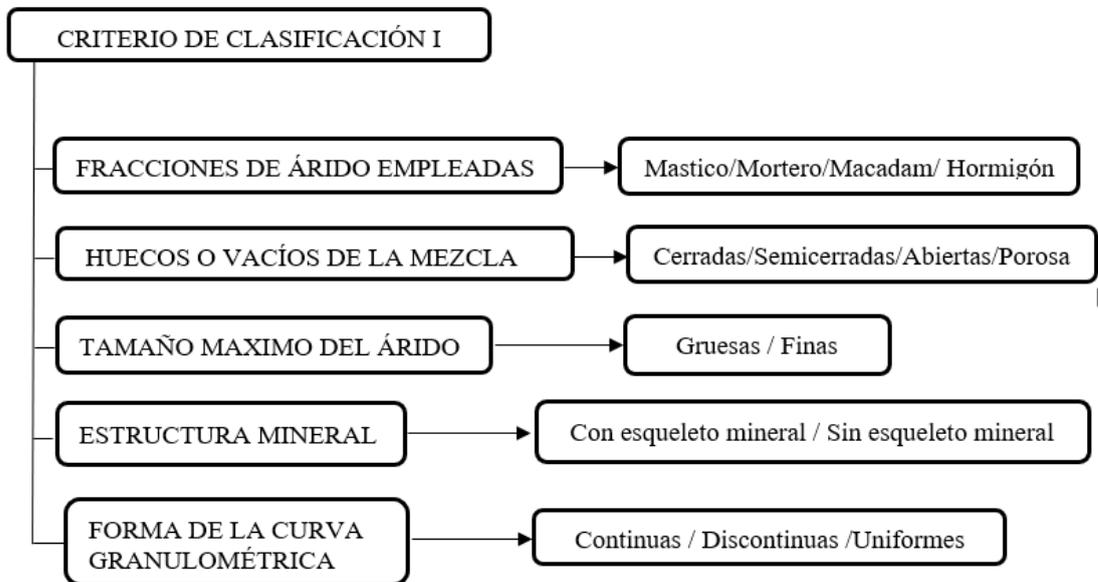


Figura 8. Criterio de clasificación I.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

Aquí tenemos unos 5 criterios de clasificación entre los cuales destacan los “Huecos de vacíos de la mezcla” en este criterio las mezclas pueden ser cerradas o abiertas entre medias que pueden ser denominadas semicerradas y finalmente incluso hay unas mezclas muy abiertas con una misión muy específica a las que se denomina porosas. Otro importante criterio es el de la forma de la “curva granulométrica” es decir como es la representación de la distribución de tamaños del agregado, tradicionalmente lo que se han utilizado son granulometrías continuas en ocasiones se utilizaba granulometrías uniformes, es decir todas las partículas del mismo tamaño, pero en las últimas décadas ha predominado el uso de mezclas asfálticas en las cuales la granulometría del agregado o árido es discontinua (Del val, 2020).

Pero en todo caso el criterio fundamental de clasificación es el que se refiere a la temperatura de fabricación y puesta en obra:

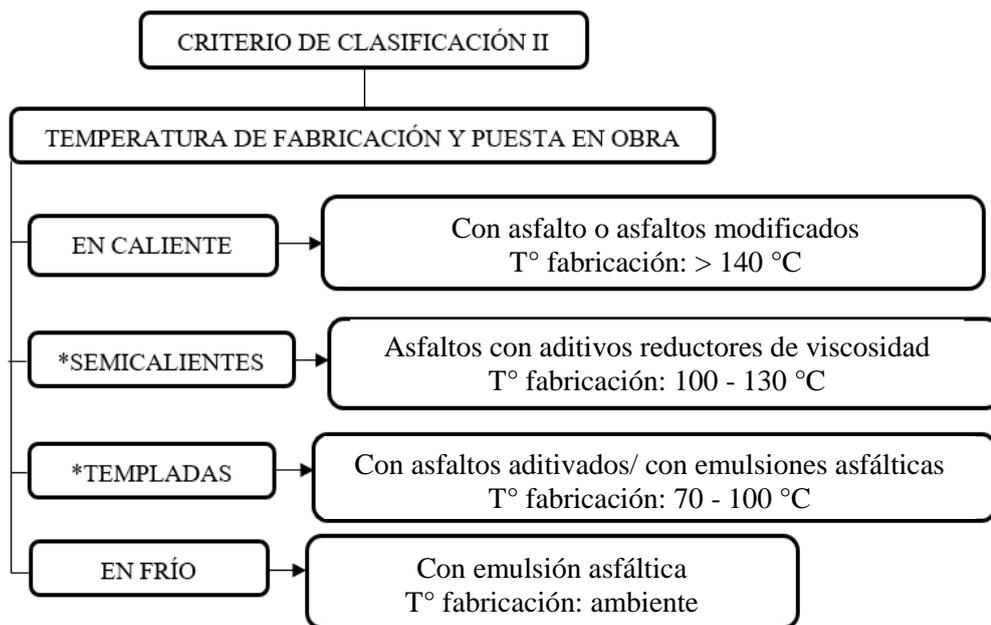


Figura 9. Criterio de clasificación II.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

De estos criterios de clasificación tenemos a las mezclas asfálticas en caliente, la cual necesitan ser fabricadas y puestas en obra a temperaturas muy superiores al ambiente, muy por encima de los 100 °C, y en el otro extremo tenemos a las mezclas asfálticas en frío, que son basados en el empleo de emulsiones bituminosas que se pueden fabricar y poner en obra a temperatura ambiente, también han surgido en los últimos 10 a 15 años otros tipos de mezclas asfálticas, por ejemplo en España se les denomina mezclas semicalientes y templadas, la razón de ser de las mezclas semicalientes es poder disminuir la temperatura de fabricación y de esta manera reducir el consumo energético y por tanto también la emisión de gases de efecto invernadero, y las mezclas templadas que consiste en partiendo de la tecnología en frío someter a las mezclas en su proceso de fabricación a una temperatura relativamente elevada aunque por debajo de los 100 °C para así conseguir unas mejores características en un plazo más breve (UPM,2020).

Diseño de mezclas asfálticas por Método Marshall

El método de formulación de mezclas asfálticas tipo “Asphalt Concrete” que se basa en el ensayo llamado Marshall es el que más se ha utilizado en todos los países, desde que fue puesto después de la guerra del pacífico por el cuerpo de ingenieros de los EEUU, este método Marshall solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentos que tengan agregados con un tamaño no mayor a 25 mm (1”), existe un método modificado que se realizó para tamaños máximo arriba de 38mm (Del val,2020)

En el método Marshall se fabrican mediante impactos unas probetas de mezclas que tienen unas determinadas características (75 o 50 golpes/cara), en primer lugar se establecen cuáles son las características volumétricas de la mezcla, se fabrican distintas mezclas con contenidos diferentes de ligantes y se determina la densidad aparente (g/cm³) y luego en función del peso específico de los áridos y del ligante se calculan los huecos en áridos (%) lo que en algunos países de Latinoamérica se llama vacíos en agregado mineral, y se calculan así mismo los huecos en mezcla (%), o sea los vacíos finales tras la compactación (UPM, 2020)

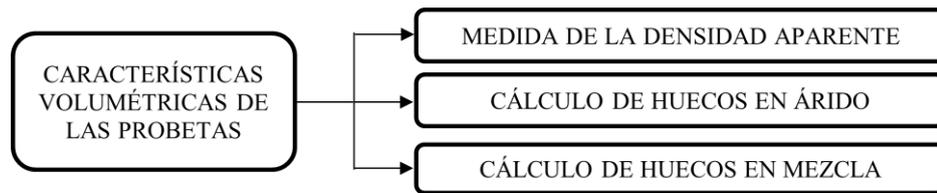


Figura 10. Características volumétricas de las probetas.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

Seguidamente se procede a llevar a cabo el ensayo mecánico de Rotura de las probetas que se realiza en unas determinadas condiciones de temperatura (60 °C) y de velocidad de aplicación de la carga (50.8 mm/min), y mediante este ensayo mecánico se determinan otros dos parámetros: Determinación de estabilidad (kN) y Determinación de la deformación (mm) (Del val, 2020).

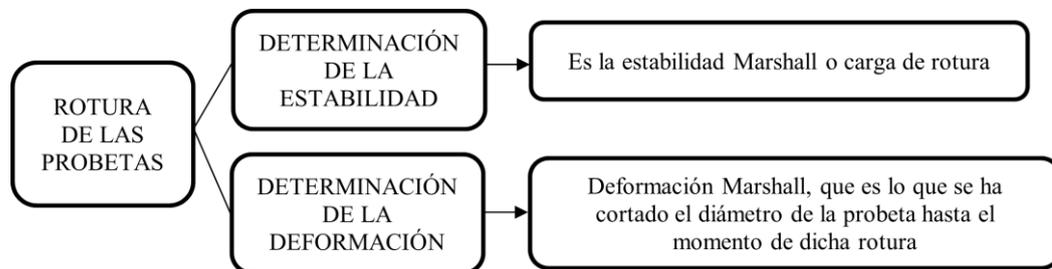


Figura 11. Rotura de las probetas.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

Los resultados se representan gráficamente y en función del análisis de las curvas se determina en un principio el contenido óptimo de betún asfáltico, este es en el caso de que se esté formulando un Asphalt Concrete en Europa, a continuación, lo que habría que hacer es someter esa mezcla a los ensayos de resistencia a las deformaciones plásticas y de tracción indirecta antes y después de inmersión (UPM, 2020).

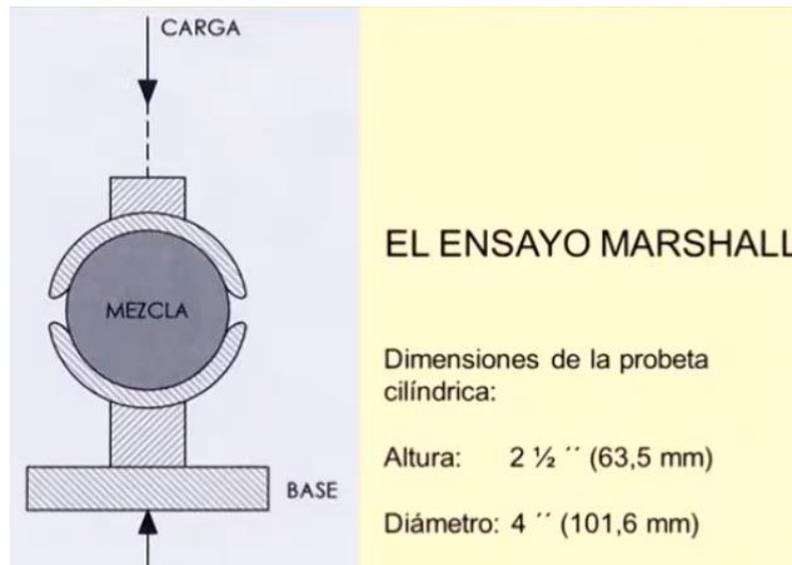


Figura 12. Ensayo Marshall.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

En la Fig. 12 podemos apreciar cómo es la probeta y las acciones a las que se somete para llegar a su rotura, son probetas cilíndricas de más diámetro (4 “) que altura (2 ½ “), y la probeta a la temperatura (60 °C) prescrita en el ensayo; entonces se introduce entre esas mordazas, se aplica la carga y se determina cual es el momento de la rotura, momento en el cual la carga tendrá un valor determinado lo que hemos denominado Estabilidad Marshall y las mordazas se habrán aproximado una longitud que es lo que denominamos Deformación Marshall

Curvas Marshall

En las curvas Marshall vemos en ellas representadas la variación de las distintas características o parámetros del ensayo en función del contenido del ligante, son las curvas de: Densidad, Estabilidad, Deformación, Porcentajes de huecos en mezcla, Porcentajes de huecos en áridos.

Densidad (g/cm³)

Inicialmente a medida que se va incorporando más ligantes, este ligante va ocupando huecos que había entre las partículas del agregado, y a medida que el peso específico del ligante es superior al del vacío la densidad aumenta,

pero llega un momento que lo que hace el ligante es separar las partículas de árido, en la medida en que el peso específico del ligante es muy inferior al peso específico de las partículas minerales la densidad empieza a caer.

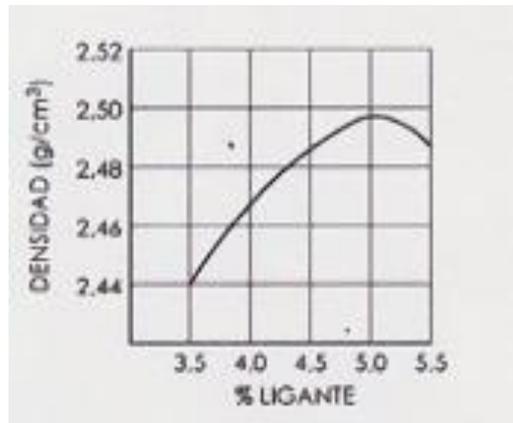


Figura 13. Curva Densidad Marshall.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid.

Estabilidad (KN)

Para este caso cuando se va incrementando la cantidad del ligante vamos aumentando la componente de cohesión en la resistencia global de la mezcla, sin embargo, llega un momento en que incorporar más ligante no supone un aumento significativo de la cohesión y por el contrario al separarse los áridos disminuye muy apreciablemente el rozamiento interno y por lo tanto la resistencia global de la mezcla.

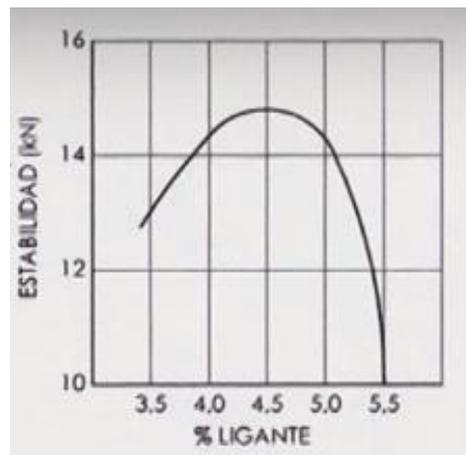


Figura 14. Curva Estabilidad Marshall.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid

Deformación (mm)

Como el componente deformable de la mezcla es el ligante y por eso a medida que aumenta el contenido de este aumenta la deformación de la mezcla.

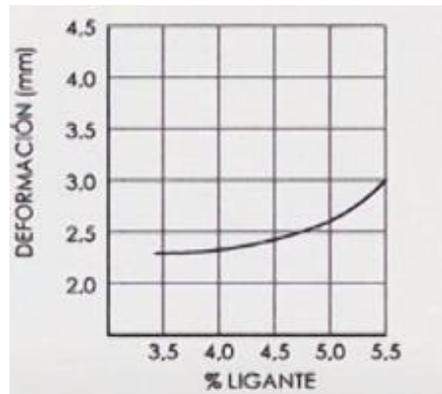


Figura 15. Curva Deformación Marshall.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid

Porcentaje de huecos mezcla (%)

Según se va incorporando ligante van quedando menos huecos en esta mezcla.

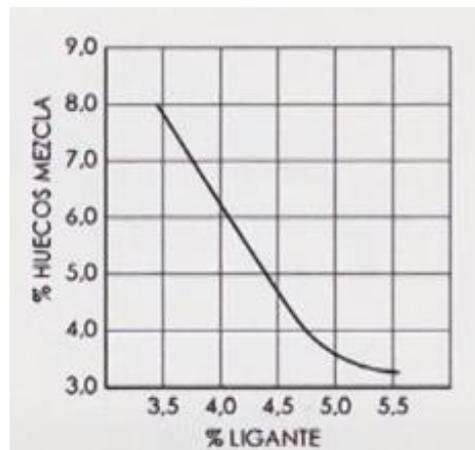


Figura 16. Curva Porcentaje de huecos Mezcla Marshall.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid

Porcentaje de huecos áridos (%)

Para esta curva no tiene una explicación tan evidente por su forma, es una curva cóncava hacia las “y” positivas y que presenta un mínimo, los huecos en áridos son la suma de los huecos en mezcla cuya variación se vio anteriormente y de los huecos ocupados con el ligante, a medida que incorporamos más ligante hay más proporción de huecos que están ocupados por ligantes, la suma de una curva descendente y una ascendente tiene la forma que se ve en la Fig. 17.

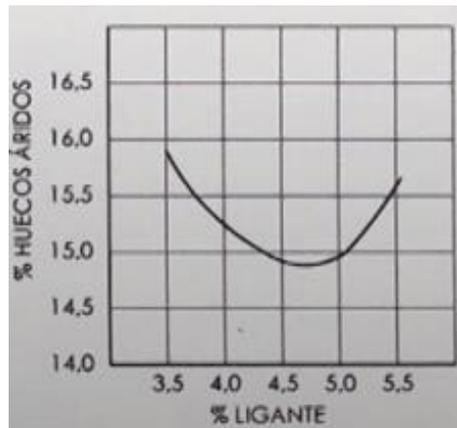


Figura 17. Curva Porcentaje de huecos áridos Marshall.

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid

Diseño de mezclas asfálticas por Método Superpave

En 1973 ocurrió un evento importante en Estados Unidos, denominado “crisis del petróleo”, donde este país sufre un embargo del petróleo por lo que las empresas tuvieron que conseguir el asfalto con otros proveedores, lo cual ocasionó que se obtengan asfaltos con diferentes comportamientos y varios de estos fallaran. A raíz de esta preocupación del deterioro del pavimento asfáltico de las carreteras, el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras “SHRP” (Strategic Highway Research Program), financiado por el gobierno de Estados Unidos con 150 millones de dólares, desarrolló el Sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) (IDECVIAL, 2022).

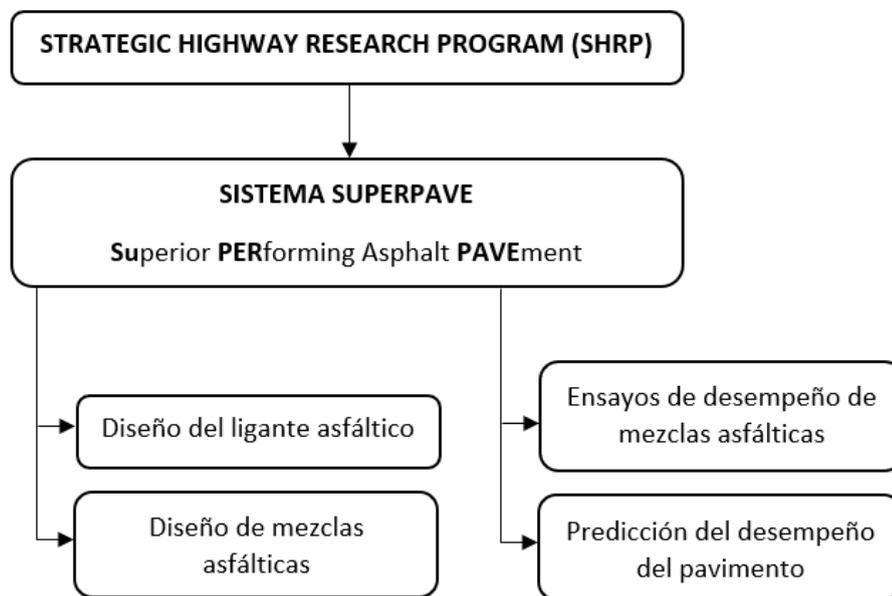


Figura 18. Sistema Superpave

Fuente: IDECVIAL, 2022.

Comportamiento de la mezcla asfáltica

El comportamiento de la mezcla asfáltica lo da el asfalto, este permite una adherencia junto con los agregados, además, brinda una permeabilidad y protege a las capas inferiores de la carpeta asfáltica de filtraciones de agua, que puede comprometer estructuralmente al pavimento. Pero la propiedad más particularidad del asfalto es que es viscoelástico (IDECVIAL, 2022).

Con respecto a la elasticidad, según la ley de Hooke, la tensión es directamente proporcional a la deformación. A un material elástico se le aplica un esfuerzo y este va a tratar de retener su forma (IDECVIAL, 2022).

$$\text{Ley de Hooke: } \tau = G * \gamma \quad (1)$$

Donde:

G: Módulo de rigidez

τ : Esfuerzo

γ : Deformación

En el caso de la viscosidad, es una propiedad física que tienen los fluidos, lo cual hace que estos tengan la capacidad de resistirse a fluir.

$$\text{Ley de Newton: } \tau = \eta * \dot{\gamma} \quad (2)$$

Donde:

η : Coeficiente de viscosidad

τ : Esfuerzo

$\dot{\gamma}$: Deformación

A la hora de clasificar el ligante asfáltico por PG, este diseñado para soportar los 3 principales estados de falla del pavimento:

1. Deformación permanente (Ahuellamiento): se da con temperaturas altas, en estos casos el asfalto pierde rigidez, el aumento de temperatura hace que este se vaya convirtiendo poco a poco en un fluido y se va deformando.



Figura 19. Ahuellamiento en pavimentos.

Fuente: Diccionario geotecnia.

2. Fisuración por fatiga (Piel de cocodrilo): ocurre a temperaturas intermedias, donde el asfalto a través del tiempo va envejeciendo y a su vez oxidando, este se vuelve más rígido, por lo tanto, se va fracturando y fisurando, las pequeñas fisuras se van conectando, haciendo que el asfalto tenga una apariencia de piel de cocodrilo.



Figura 20. Fisuración por fatiga.

Fuente: Diccionario geotecnia.

3. Fisuramiento térmico: el asfalto a temperaturas bajas va acumulando tensiones, deformaciones internas, al estar a temperaturas bajas se comporta como un sólido elástico, tiene más rigidez, y esas tensiones internas sumadas al tráfico, sobrepasa la capacidad material del asfalto, pero no actuará como sólido elástico, en vez de deformarse, se va a fisurar.



Figura 21. Fisuración térmica

Fuente: Geotexan.

Equipos Superpave

- Reómetro Dinámico de Corte (DSR)

Permite conocer parámetros reológicos del asfalto, además que permite predecir el comportamiento del asfalto a corto, mediano y largo plazo.

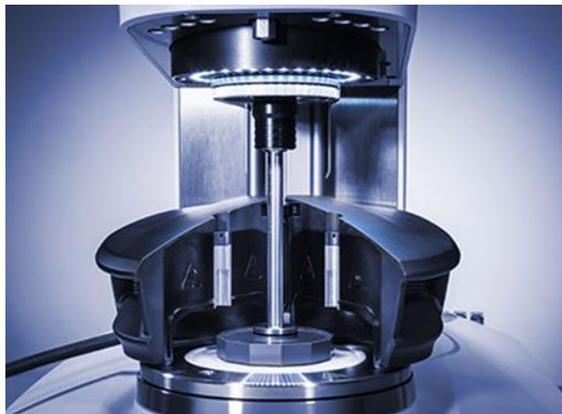


Figura 22. Reómetro Dinámico de Corte.

Fuente: Anton Paar.

Es importante conocer cuál es el módulo complejo del asfalto (G^*) a determinadas temperaturas, sobre todo a altas temperaturas porque así podremos determinar la resistencia total del material y cómo se va a ir deformando por su comportamiento viscoelástico. Este ensayo permite conocer hacia donde se orienta el comportamiento del asfalto, si hacia un comportamiento elástico o viscoso, por lo que se obtiene el ángulo de fase (δ) que mide el comportamiento visco elástico del material, es decir, la deformación que es recuperable o elástica y la no recuperable o viscosa. (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

- Viscosímetro Rotacional (RV)

Caracteriza el módulo de rigidez del asfalto a una temperatura de 135 °C, a la cual actúa casi totalmente como un fluido. Consiste en un cilindro coaxial rotacional, que mide la viscosidad por medio del torque requerido para rotar un eje, sumergido en una muestra de asfalto caliente, a una velocidad constante (E-Asphalt).



Figura 23. Viscosímetro Rotacional.

Fuente: PCE ibérica.

Muchos líquidos están expuestos a cargas térmicas y, por tanto, cambian su viscosidad, como los aceites de motor. Aquí es exactamente donde entra en juego el viscosímetro rotacional. El sensor de temperatura de inmersión determina la temperatura de la muestra en un rango entre 0 ... 100 °C durante la medición. Para obtener un historial de la medición, el viscosímetro puede conectarse a un PC a través de la interfaz RS-232. Con el software opcional, se puede crear una curva de temperatura y viscosidad durante una medición (PCE Ibérica).

Niveles de diseño para mezcla asfáltica Superpave

Luego de ya conocer los 3 estados de falla de la carpeta asfáltica, se debe revisar la forma en que los métodos de diseño que utilizamos cumplan o no con estas proposiciones. Para cumplir con los requerimientos conceptuales de una mezcla de alto desempeño, un método de diseño de mezclas debe tener tres partes básicas: 1) Selección del ligante y el modificante, si aplica, y del agregado pétreo, 2) Análisis volumétrico (que incluye rangos basados en experiencias llamadas universales de comportamiento), y 3) Evaluación del desempeño (incluye ensayos con carga monotónica y cíclica, bajo diversas condiciones externas de carga y ambiente) (RAMCODES, 2012).

Para ubicar los métodos de diseño según atiendan al concepto de mezcla de alto desempeño se utilizará la Pirámide Mexicana de Diseño de MMAACC que proponen en conjunto la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) y el Instituto Mexicano del Asfalto (IMT). Esta pirámide presenta una jerarquía de cuatro niveles de diseño desde lo más básico hasta lo más elaborado. La selección del nivel dependerá de qué tan cargada estará la vía.

NIVELES DE DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS AMAAC 2008



Figura 24. Niveles de diseño para mezclas asfálticas.

Fuente: AMAAC, 2008.

1er nivel: se establecen los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, como es el porcentaje de vacíos de aire, porcentaje de agregado mineral, porcentaje de vacíos de asfalto efectivo. También se realizará un ensayo de susceptibilidad a la humedad y establecer el grado de desempeño (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

2do nivel: en el caso que se considere una carretera con un mayor volumen de tráfico se diseñaría con este segundo nivel, donde se repite lo realizado en el primer nivel y se hace el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente (ensayo de ahuellamiento) (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

3er nivel: si se requiere una carretera con un mayor volumen de tráfico, como en el caso anterior, repetiremos lo hecho en el segundo nivel y además de un ensayo de desempeño adicional, el ensayo de módulo dinámico (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

4to nivel: en este último caso será cuando se requiera un tráfico muy pesado a velocidades cortas, donde se repite el tercer nivel y se aumenta el ensayo de fatiga (Ingeniería Vial en Acción, 2020).

Grado de desempeño (PG)

El grado de desempeño cubre un rango de temperaturas de desempeño del ligante asfáltico y se realiza con ensayos que replican las condiciones a las que estará sometido el ligante asfáltico durante su periodo de servicio. (IDECVIAL, 2022).



Figura 25. Grado de desempeño.

Fuente: Grupo Súrfox, 2015.

2.3.3 Agregados para mezclas asfálticas

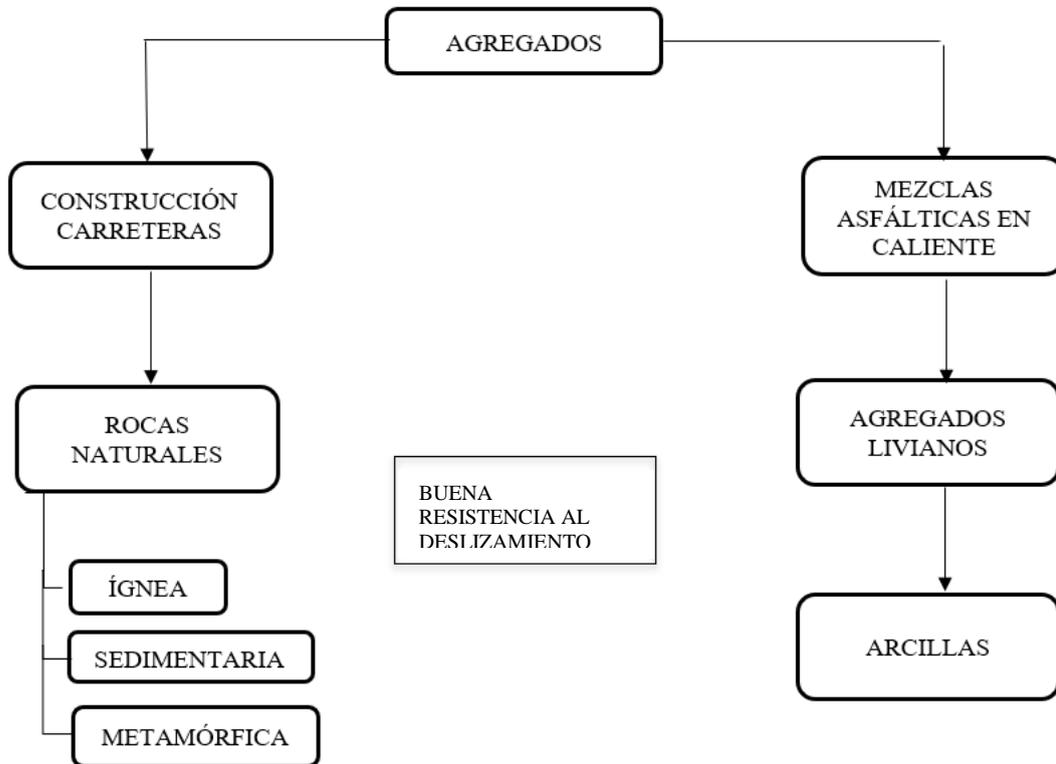


Figura 26. Agregados para mezclas asfálticas.

Fuente: Elaboración propia.

Algunos agregados pueden ser no adecuados para la construcción de pavimentos debido a su composición química de las partículas de dichos agregados, ya que en las mezclas asfálticas hay ciertos agregados que tienen una gran “simpatía” por el agua y por esta razón pueden ayudar a que se levante o retire el asfalto, lo que lleva a la desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica, entonces a esto llamamos agregado hidrofóbico el cual tiene un alto grado de resistencia a la remoción de la carpeta asfáltica cuando está en presencia del agua. Como sabemos el ligante asfáltico en la mezcla asfáltica lo que hace es rodear a las partículas del agregado en formas de delgadas películas y de esta manera llenan los espacios vacíos entre partículas y así las películas del material asfáltico se pegan a la superficie de los agregados normales y de esta forma ayudan a la resistencia al corte de la mezcla a lo que se llama cohesión de la mezcla (Pavimentos, 2014).

En conclusión, tenemos dos tipos de agregados en presencia de agua:

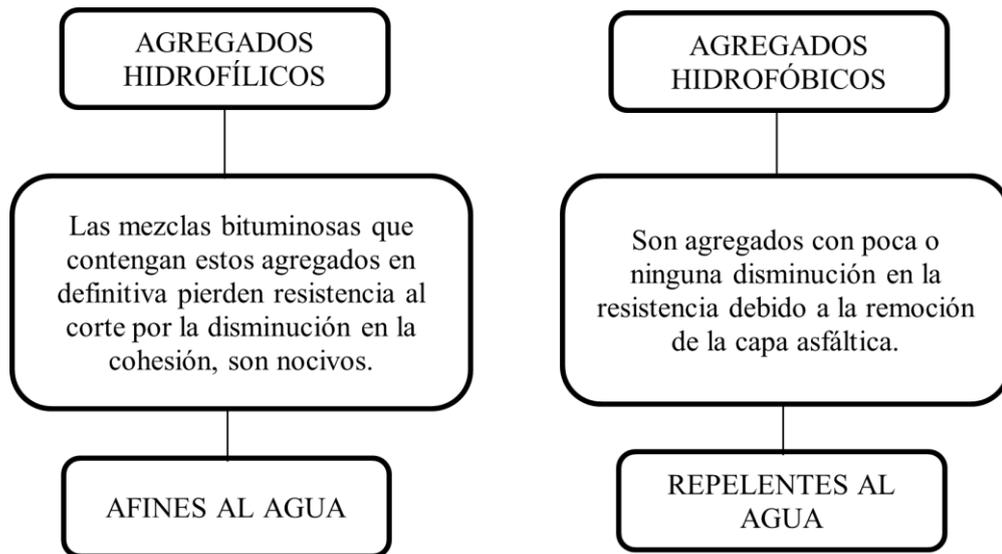


Figura 27. Agregados hidrofílicos e hidrofóbicos.

Fuente: Elaboración propia.

En su gran mayoría los agregados se componen por varios minerales. Cuando se realiza el ensayo de residuo de ácido insoluble ASTM D-3042, este es para calcular la cantidad de materiales duros que se encuentran en los carbonatos de los agregados; para asegurar una adecuada propiedad de fricción se debe contar con un mínimo de 10% de ácidos insolubles. Lo que no se desea en una mezcla asfáltica en caliente es los agregados con sustancias deletéreas (terrones de arcilla, lutita, partículas blandas), estos no se deberían usar a menos que cuando se realice el lavado u otra acción parecida se reduzca la cantidad de la matriz; así como también se especifica un mínimo de equivalente de arena ASTM D-2419 o índice máximo de plasticidad ASTM D-4318, también AASHTO M-283 nos recomienda que una vez haya sido humedecido la capa de agregados no deben de exceder el 0.5% al realizarle los ensayos ASTM C-117 (Ordóñez, 2001).

Por eso que es de suma importancia la mineralogía en los agregados que se dan en el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente ya que ahí veremos el efecto de su influencia en la adhesión y perjuicio por humedad.

Propiedades físicas de los agregados



Figura 28. Clasificación de agregados para mezclas asfálticas.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, los agregados adecuados para su uso en mezclas asfálticas en caliente se determinan evaluándolos para las siguientes características mecánicas.

- Tamaño y gradación
- Limpieza/ materiales deletéreos
- Tenacidad/ dureza
- Durabilidad / resistencia
- Textura superficial
- Forma de partículas
- Absorción
- Afinidad por el asfalto

Características de pulido de los agregados

Al ocurrir la fricción en los pavimentos flexibles este se va perdiendo paulatinamente a través del tiempo debido al pulido de su agregado; este pulido que experimenta los agregados se le conoce como la pérdida de las diminutas asperezas que se da en la superficie de rodadura denominadas microtextura, y en cuanto al desgaste sería la pérdida de la macrotextura de las

irregularidades que se presentan en la superficie. La causa principal del pulido de la carpeta asfáltica es la abrasión de las diminutas asperezas del agregado a causa del roce de las llantas del vehículo con los restos de polvo fino que se encuentran en la carretera, el cual actúan como agente abrasivo, y para la causa principal del desgaste implica una abrasión constante debido a las cargas y variaciones ambientales tales como: congelamiento-deshielo, humedecimiento-secado y la oxidación (IMT, 2010).

De esta forma el pulido y el desgaste en la mayor parte implican procesos similares que varían solamente en el grado y la tasa de pérdida de material. En las mezclas asfálticas los agregados se pulen de acuerdo a su mineralogía, de acuerdo a la Fig. 29 tenemos 5 grupos de agregados que proporcionan cierta textura al pavimento.

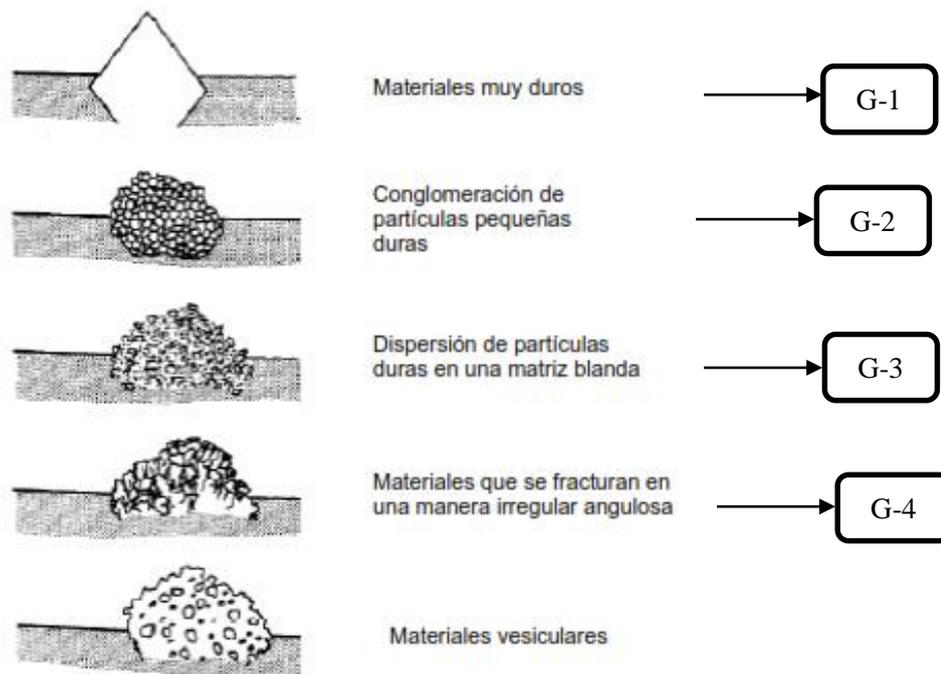


Figura 29. Tipos de agregado para proporcionar textura al pavimento.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México)

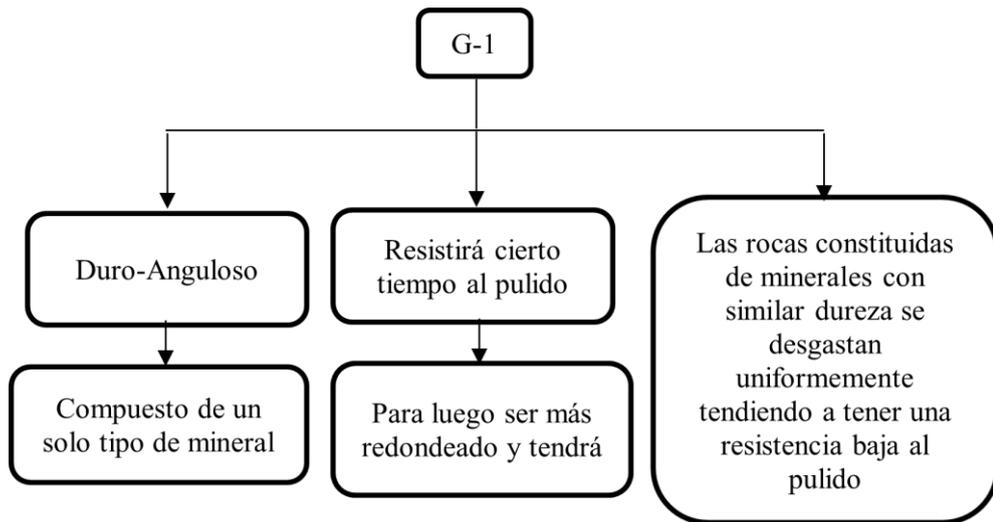


Figura 30. Materiales muy duros (G1).

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México).

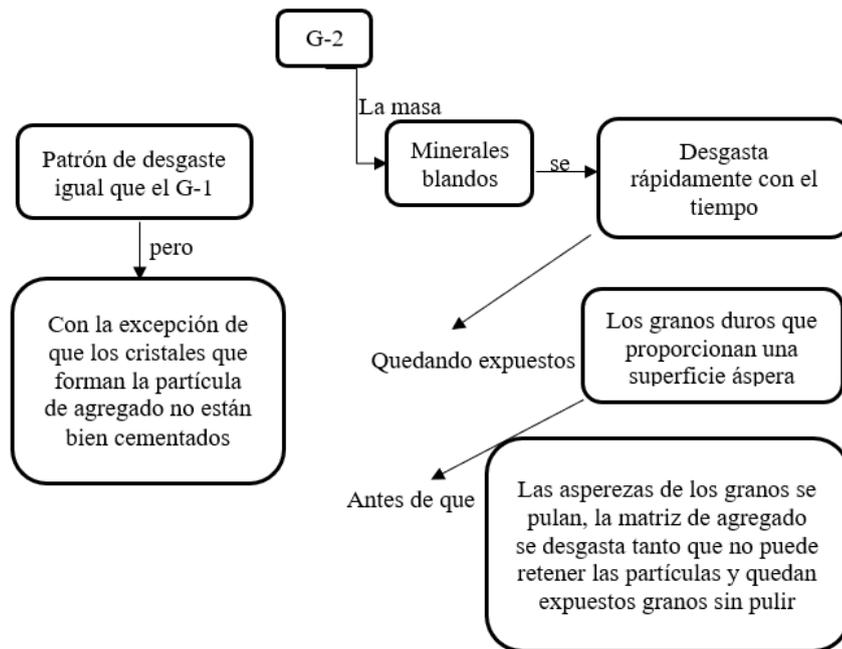


Figura 31. Conglomeración de partículas pequeñas duras (G2).

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México)

Entonces cuando hay una constante renovación de la superficie del pavimento esto hace que se mantenga una buena resistencia al deslizamiento, es por esta razón que los agregados con granos minerales con ángulos grandes, duros y gruesos que están distribuidos uniformemente en una matriz mineral blanda tienen una resistencia alta al deslizamiento (IMT, 2010).

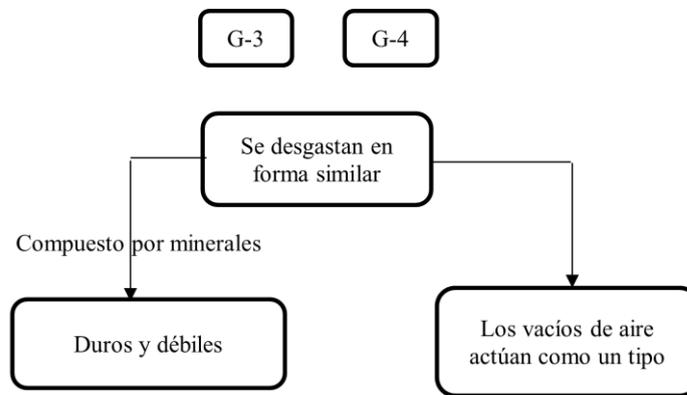


Figura 32. Agregados G3 y G4.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México).

Cada vez que las partículas son intemperizadas, se rompe el mineral débil para que de esta manera queden expuesto los minerales duros desgastados y esta acción hace que queden expuestas superficies sin intemperizar que detendrán su textura por largos periodos de tiempo para que así sus propiedades friccionantes se mantengan por más tiempo (IMT, 2010).

Cuando el pavimento esta recién terminado su fricción está al máximo después de un cierto tiempo de estar en servicio ya que los áridos superficiales empiezan a mostrar su cara, luego la resistencia al deslizamiento ira disminuyendo rápidamente cuando el agregado expuesto es desgastado, ya que su microtextura y macrotextura se disminuyen considerablemente cuando las cargas de los vehículos pulen la superficie de rodadura, después la resistencia se reduce lentamente y va alcanzar un estado de equilibrio en el cual diminutas desviaciones en la resistencia al deslizamiento son experimentadas siempre y cuando la circulación de vehículos sea constante y no tenga un deterioro evidente. De igual manera casi siempre hay una disminución del coeficiente de fricción a causa de las estaciones del año, por ejemplo en verano se dan los niveles más bajos de fricción porque el clima seco ayuda a que se acumulen

las partículas finas y polvo, y estos aceleran el pulido de la superficie de rodadura, en cambio en invierno la lluvia lava las partículas finas lo que ocasiona una macrotextura y microtextura más alta y por ende la superficie de rodadura presenta una fricción alta (IMT, 2010).

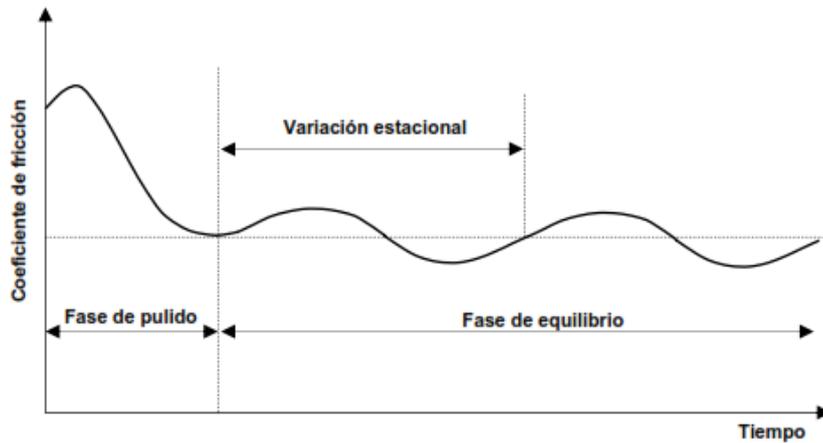


Figura 33. Modelo generalizado del pulido del pavimento.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México)

Propiedades de los agregados resistentes al pulimento

Es un factor importante las propiedades que contienen los agregados porque gracias a estos se determina el comportamiento friccionante de una superficie de rodadura ya sea de pavimento rígido o flexible, ya que el agregado es el principal componente en la mezcla asfáltica o de concreto, porque en ambos tipos de pavimentos el agregado está en contacto con los neumáticos de los vehículos que transitan por la vía; por lo tanto los agregados gruesos manejan o regulan las propiedades de las mezclas asfálticas, y los agregados finos, las propiedades friccionantes de las mezclas de concreto (IMT, 2010).

Las propiedades más resaltantes del agregado desde el punto de vista de diseño por fricción y comportamiento son:

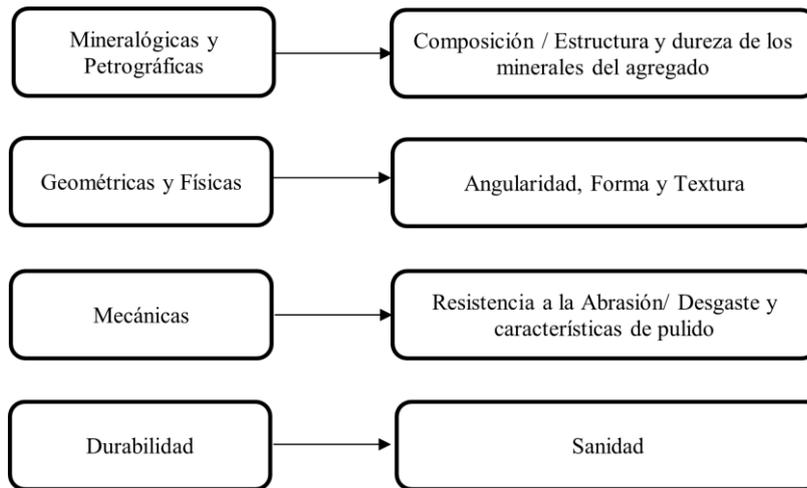


Figura 34. Modelo generalizado del pulido del pavimento.

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México)

2.3.4 Ensayos de pulimento

Los agregados presentan propiedades friccionantes las cuales están relacionadas a la resistencia al deslizamiento que tendrá un pavimento en su capa final, la cual se ve afectada por la microtextura de los agregados, por esta razón es que los agregados deben tener suficiente resistencia a ser pulido por la carga continua de los vehículos, de acuerdo a esto es que es importante hallar el comportamiento de los agregados a través de ensayos de pulimento para establecer en qué medida ayudarían a lograr capas de rodadura adecuadas y seguras. Esta característica friccionante es de mucho interés para las organizaciones de transporte desde ya un tiempo por lo cual se pide cumplir con valores específicos de valor de pulido residual mínimos para carpetas asfálticas y también para superficies de rodadura de concreto hidráulico (Pérez, 2021).

La resistencia al desprendimiento de los agregados finos y gruesos al pulido a causa de la avalancha de tráfico de vehículos es el principal factor en el comportamiento a largo plazo.

a) Valor de pulido (VP)

Conforme a la variedad de la geología existen materiales pétreos y agregados con distintas composiciones mineralógicas, esto conlleva a que tengan distintos niveles de desgaste. El valor de pulido (VP) resulta luego de que el agregado haya sido sometido a ciclos de desgaste minuciosos, y cuando el material es sometido al ensayo del pulimento acelerado este busca hallar la fricción residual del agregado (VPR), puesto que se evalúa su propiedad friccionante en este estado de pulido, cabe recalcar que el VPR es adimensional. Y conforme a la normativa de SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transporte), dentro de los requisitos de calidad para materiales pétreos que se usan en mezclas asfálticas pero teniendo en cuenta el tipo de mezcla que se usara y en el diseño de concreto hidráulico, la norma nos pide analizar las otras características importantes, tales como es el VPR o Pulimento acelerado, para esto ya se acordaron valores de pulimento acelerado para algunas capas de rodadura, esto lo podemos apreciar en las siguientes dos tablas (IMT, 2021).

Tabla 1.
Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas

Característica ⁽¹⁾		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2.4
Desgaste Los Ángeles, %, máximo		25
Desgaste Microdeval, %, máximo		15
Intemperismo Acelerado, %, (5 ciclos), máximo ⁽²⁾	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas, %, máximo		35
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	100
	Dos o más caras	90
Pulimento acelerado, %, mínimo		30
Desprendimiento por fricción, %, máximo		10
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2.4
Angularidad, %, mínimo		45
Equivalente de Arena, %, mínimo		55
Azul de metileno, mg/g, máximo		12

⁽¹⁾ El material será 100% producto de trituración de roca sana

⁽²⁾ Será suficiente que el intemperismo acelerado cumpla con una de las dos condiciones: en sulfato de sodio o en sulfato de magnesio

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2021.

Tabla 2.
Requisitos en valor de pulimento acelerado por sistema de riegos

Característica ⁽¹⁾		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2.4
Desgaste Los Ángeles, %, máximo		30
Partículas alargadas y lajeadas, %, máximo		35
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	100
	Dos o más caras	90
Pulimento acelerado, %, mínimo		30

⁽¹⁾ El material será 100% producto de trituración de roca sana

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2021.

Nos podemos dar cuenta que en ambos casos el valor de pulimento acelerado mínimo del agregado usar es 30.

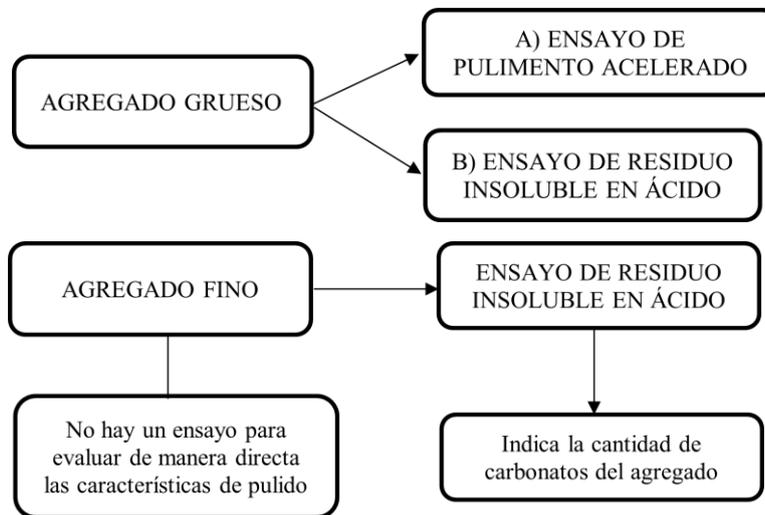


Figura 35. Agregado grueso y fino.

Fuente: Elaboración propia.

b) Ensayo de Pulimento Acelerado

El ensayo de pulimento acelerado de origen británico es una medida de la sensibilidad al pulimento del agregado por la acción del paso de los vehículos cuando pertenece a la superficie de rodadura de un pavimento y se realiza de acuerdo con la norma, el cual consta de 3 pasos principales: Preparación de los especímenes, el pulido de los especímenes en la máquina de pulimento acelerado y el ensaye de fricción con el Péndulo Británico (Pérez, 2021).

Cabe recalcar que el método es basado en las normas internacionales ASTM D3319-17 Y ASTM E303-22 los cuales son: Práctica estándar para el pulido acelerado de agregados utilizando la rueda británica y Método de prueba estándar para medir las propiedades de fricción de la superficie utilizando el equipo de péndulo británico, respectivamente.

En México se usa la norma: TEX-438-A, en España se efectúa el método de la norma UNE-EN 1097-8 (Ensayos para determinar las prestaciones mecánicas y físicas de los áridos).

Para la realización del ensayo se colocan los áridos en un molde con una cierta curvatura y se fijan mediante un mortero de resina, para luego someter a pulido las probetas que se realizaron con agregado que pasa la malla de 3/8" y se retiene en la malla de 1/4" como podemos apreciar en la Fig. 36 para luego colocarlas en la rueda metálica de la máquina del pulimento acelerado y de esta manera son sometidas al pulido durante un cierto tiempo que sería prácticamente un número determinado de horas, aunque el tiempo va a depender del método de prueba utilizado esto podemos apreciarlo en la Fig. 37, el pulido se va a lograr a base del empleo de un neumático lizo de hule macizo, abrasivo y agua (IMT, 2021).



Figura 36. Probetas elaboradas con el agregado de prueba.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte



Figura 37. Vista de las probetas en rueda de ensaye.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

Para aparentar ese desgaste que va a sufrir el agregado en el campo, se utiliza la máquina de pulimento acelerado, la cual está constituida por:

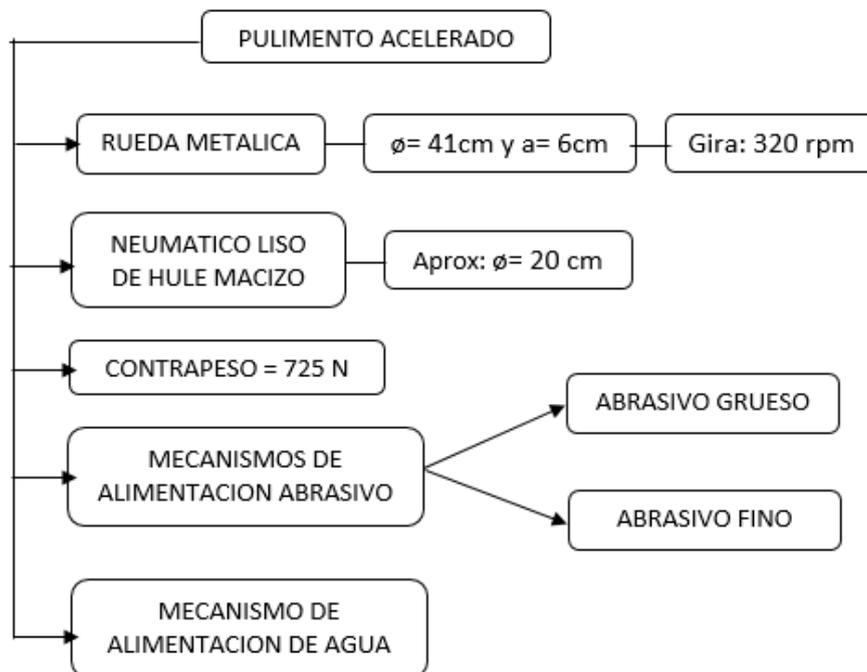


Figura 38. Componentes del equipo del pulimento acelerado.

Fuente: Elaboración propia



Figura 39. Equipo para Pulimento acelerado.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

Una vez que las probetas hayan sido sujetas a desgaste, se procede a hallar el grado de pulido de cada una de ellas, para lo cual se hará uso del equipo del TRRL o Péndulo Británico, y el resultado de cada lectura se expresa como el VPR o pulimento acelerado o fricción residual del agregado. Tener en cuenta que el ensayo del pulimento acelerado se debe repetir por lo menos de 7 probetas y que estas hayan sido hechas de un mismo material, para lo cual de cada probeta se obtendrá cuatro lecturas del péndulo; el promedio final (promedio de probetas individuales y promedio de probetas) es el reportado como finalizado del material y se le llama VPR (IMT, 2021).

c) Ensayo de residuo insoluble en ácido

El ensayo de residuo insoluble en ácido es rápido y fácil de realizar, es recomendable como prueba inicial para evaluar las propiedades de desgaste-pulido de los agregados, o como complemento al ensayo de pulimento acelerado, este ensayo nos da el porcentaje de material sin carbonatos (residuo insoluble) en agregados calcáreos (Pérez, 2021).

2.3.5 Textura superficial del pavimento asfáltico

Los pavimentos tienen características estructurales y características superficiales, dentro de las características superficiales existe a lo que llamamos la superficie de rodadura o carpeta asfáltica que es por donde circulan los vehículos. Así, encontramos aquí a la textura, la cual nos dará la comodidad y sobre todo la seguridad para los usuarios, indispensable para el cuidado de las carreteras, esta textura afecta de primera mano en la capacidad del pavimento para drenar el agua de la condición neumático-pavimento y, de forma indirecta en el valor del coeficiente de fricción o rozamiento del pavimento, pero no solo la textura daría solo seguridad y comodidad, también está el nivel del ruido del tráfico, y en el aspecto económico también es resaltante la textura ya que va influir en el consumo de combustible, el daño de los vehículos porque va haber un desgaste de los neumáticos (Rivas, 2017).

2.3.6 Microtextura

Crespo del Río (1999) señala que “la microtextura son desviaciones de la superficie de pavimento para una superficie plana, con longitudes de onda menores a 0,5 mm que nos garantiza adherencia ya que nos proporciona el contacto directo entre el neumático y pavimento” (Roco, 2016).

La microtextura es la textura superficial de los agregados pétreos y se podría decir que una forma indirecta de hallar el valor de la microtextura es a través del coeficiente de fricción, ya que la microtextura siempre es necesario inclusive cuando la superficie de rodadura esté seca (Fleites, 2017). Por esta razón tiene relación con la resistencia al deslizamiento, porque para que el pavimento ofrezca la adherencia necesaria a cuál sea la velocidad a la que vaya un vehículo debe poseer una microtextura áspera.

2.3.7 Macrotextura

Crespo del Río (1999) señala que “la macrotextura son las desviaciones de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana verdadera, con longitudes de onda entre 0,5 y 50mm y está asociada, fundamentalmente, a la composición granulométrica de la capa de rodadura y a los tratamientos que se hayan llevado a cabo sobre ella” (Rivas, 2017, p.32).

La macrotextura viene a ser la textura superficial del pavimento, en este caso de la propia carpeta asfáltica ya que es la mezcla o conjunto de las partículas de los agregados pétreos que están sobresaliendo de la superficie de rodadura, entonces para que la macrotextura nos ofrezca también esta adherencia necesaria y óptima en su superficie por donde circulan los vehículos a grandes velocidades debería de poseer una macrotextura gruesa. (Fleites, 2017).

En esta fase de la textura los parámetros de Coeficiente de Fricción, Ruido, el cual es generado por la interacción neumático-pavimento, hidroplaneo o también llamado aquaplaning y la resistencia al deslizamiento son afectados directamente por la Macrotextura, es por ello que la macrotextura es considerada a nivel global la fase más importante de la superficie de rodadura del pavimento porque de esta depende la seguridad de todos los usuarios que transitan sobre las carreteras (Board et al., 2021).

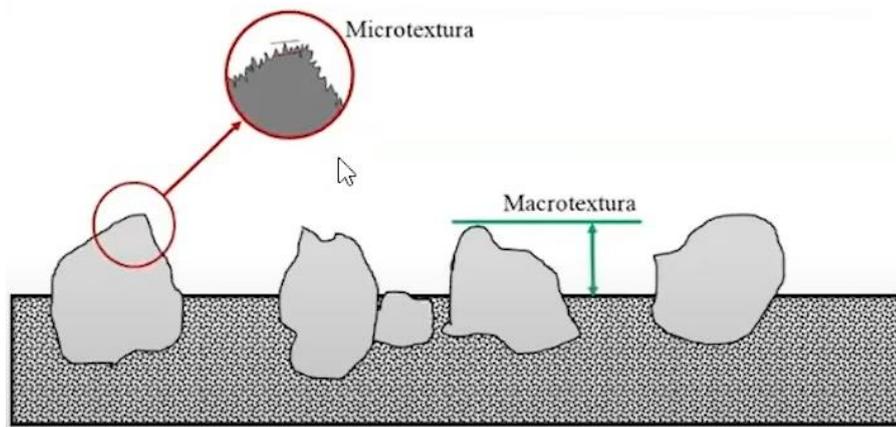


Figura 40. Microtextura y macrotextura en pavimentos.

Fuente: Adaptada de (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2016).

2.3.8 Megatextura

Crespo del Río (1999) señala que “la megatextura son desviaciones de la superficie del pavimento con respecto a una superficie plana verdadera con longitudes entre 50 y 500mm y esta fase de la textura presenta longitudes de onda del mismo orden que el neumático al contacto con la superficie de rodadura, la que normalmente fueron hechas por baches u ondulaciones” (Rivas, 2017, p.33).

La megatextura como podemos observar en la tabla 4 es la que concierne a la textura con mayor longitud de onda, es por eso que sería la que más se acerca a la rugosidad, por ejemplo, los baches sería un ejemplo de megatextura elevada (Fleites, 2017).

En la megatextura básicamente estamos en la zona en la cual se evalúa principalmente el IRI (Índice de Regularidad Internacional), ya que el IRI se empieza a evaluar a partir de la megatextura para adelante.

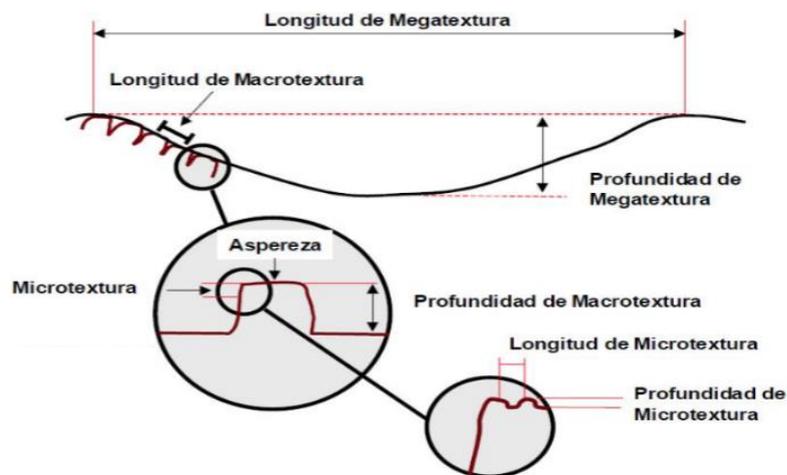


Figura 41. Fases de textura de la carpeta asfáltica.

Fuente: Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile, 2016.

Tabla 3.
Combinaciones de microtextura y macrotextura

SUPERFICIE		CLASES DE TEXTURA	
		MACRO	MICRO
A		GRUESA	ASPERA
B		GRUESA	PULIDA
C		FINA	ASPERA
D		FINA	PULIDA

← ADECUADO

Fuente: Pulimentos de agregados empleados en capa de rodamiento, 2005.

Tabla 4.
Longitudes de onda asociadas a cada tipo de textura

Textura	Longitud de Onda
Mega Textura	50 - 500 mm
Macro Textura	0,5 – 50 mm
Micro Textura	0,0 – 0,5 mm

Fuente: Pulimentos de agregados empleados en capa de rodamiento, 2005.

2.3.9 Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento en los pavimentos está asociada a los dos tipos de textura los cuales son: la microtextura y macrotextura, la microtextura proporciona la adherencia suficiente entre neumático-pavimento y esto se da a través de las asperezas de las partículas individuales del agregado pétreo, y la macrotextura proporciona el drenaje, ya que va a facilitar la evacuación del agua existente en la superficie de rodadura producto de lluvias o filtración de agua de algún lugar y así pueda evitarse el fenómeno llamado hidropeldeo (SCT, 2016).

Entonces la resistencia al deslizamiento viene a ser: “la fuerza que se desarrolla a lo largo de la superficie de un pavimento, cuando un neumático está frenado o impedido de girar, usualmente, la resistencia al deslizamiento es comprendida como la propiedad de una superficie que impide el deslizamiento de un cuerpo sobre ella” (MTC, 2017, p.975).

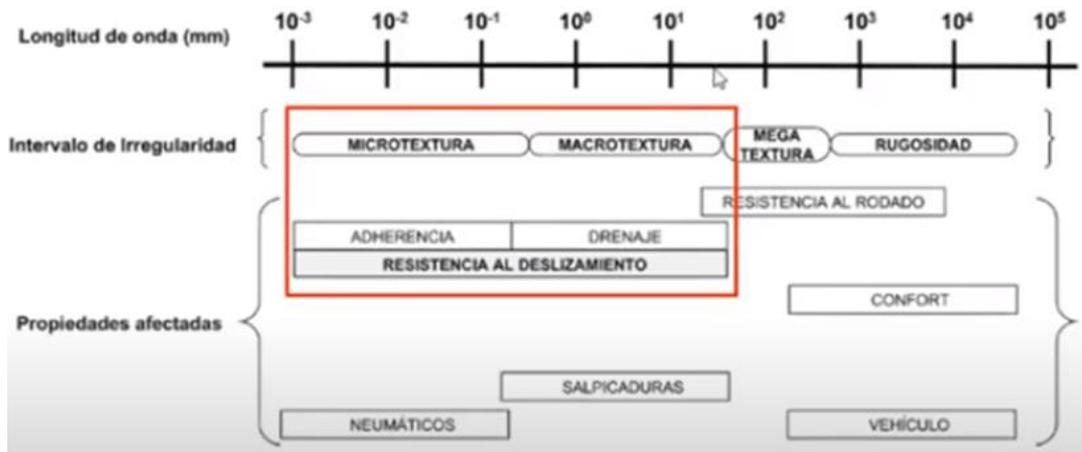


Figura 42. Ubicación de la resistencia al deslizamiento
Fuente: COINCRUZ.

Se le puede llamar resistencia o fricción al deslizamiento, entonces cuando tengamos que hallar esta adherencia necesaria entre neumático-pavimento se tendrá que hallar el parámetro de coeficiente de rozamiento, este valor de coeficiente de rozamiento no solo va depender de la condición de la carretera o mejor dicho de la carpeta asfáltica sino que también de otros factores que ya vienen a ser responsabilidad de uno mismo como conductor o usuario, por ejemplo: en qué estado se encuentra los neumáticos del vehículo o también la velocidad en que uno conduce; también otro factor son los fenómenos naturales tales como: Lluvia, filtración de agua, nieve, etc. (Cárdenas, 2019).

Por lo tanto, este parámetro o valor de la resistencia al deslizamiento que deben tener los pavimentos en su última capa (carpeta asfáltica) deberían de ser revisados cada cierto periodo a través de equipos y ensayos, por la razón de que el nivel de adherencia que tiene que haber entre neumático-pavimento a través del tiempo se deteriora por acción del tráfico, ya que la superficie de rodadura se va puliendo por la carga de los vehículos que transitan diariamente por ella (Cárdenas, 2019).

2.3.10 Índice de fricción internacional (IFI)

Se realizó un estudio en España y Bélgica experimentando el Índice de Fricción Internacional la cual fue efectuada por la PIARC para que se pueda comparar y conciliar las distintas medidas de Macrotextura y Resistencia al deslizamiento (CRD), este índice hace una conciliación de las mediciones de fricción con los distintos equipos para que haya un índice calibrado común, de esta manera la experimentación da la armonía de los informes de fricción para equipos que usan un neumático de prueba de banda de rodadura ligera, este IFI tiene dos parámetros los cuales son: que dan la fricción húmeda calibrada a 60 Km/h (F60) y la constante de velocidad de fricción del pavimento (Mundaca, 2019).

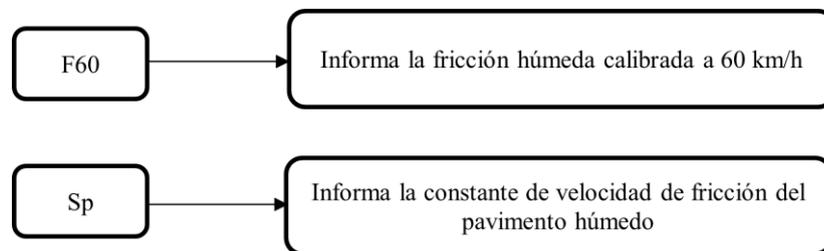


Figura 43. Parámetros del IFI.

Fuente: Mundaca, 2019.

2.3.11 Parámetros internacionales

A continuación, se mencionarán valores de fricción y macrotextura exigidos por norma por algunos países:

a) En Chile:

- Coeficiente de fricción:

La medición de este parámetro se efectuará de preferencia dentro de un plazo de cuatro meses, después de dado el tránsito.

Valores mínimos con SCRIM:

Tabla 5.

Valores mínimos coeficiente fricción con equipo SCRIM (Chile)

Descripción del Sector		SFC
Sectores con Singularidades	Curvas de radio inferior a 100 m Pendientes $\geq 10\%$ Aproximación a Intersecciones Intersecciones Aproximaciones a Semáforos Aproximación a Señalización de Prioridad Ramales	0,55
Sectores sin Singularidades		0,40

Fuente: Manual de Carreteras V-5, Chile.

Valores mínimos con Péndulo Británico (TRRL):

Tabla 6.

Valores mínimos coeficiente fricción con péndulo TRRL (Chile)

Descripción del Sector		
Sectores con Singularidades	Curvas de radio inferior a 100 m Pendiente $\geq 10\%$ Aproximación a Intersecciones Intersecciones Aproximaciones a Semáforos Aproximación a Señalización de Prioridad Ramales	Mín. 65
Sectores sin Singularidades		Mín. 55

Fuente: Manual de Carreteras V-5, Chile.

- Macrotextura:

La medición de este parámetro se efectuará con el ensaye de la mancha de arena según lo descrito en 8.602.25 del M.C.-V.8 dentro de un plazo de cuatro meses, después de dado el tránsito.

Tabla 7.
Valores mínimo para macrotextura superficial (Chile)

ENSAYE	EXIGENCIA
Macrotextura para todo tipo de capa de rodadura	Mínimo 0,6 mm

Fuente: Manual de Carreteras V-5, Chile.

b) En Argentina:

- Coeficiente de fricción:

Coeficiente de fricción medido con el equipo Mu meter, este valor deberá ser mayor o igual a 0.40 en promedio por kilómetro.

- Macrotextura:

Se considera como valor mínimo para la macrotextura o profundidad de textura media (MTD) 0.50 mm medido con el Circulo de Arena.

c) En México:

- Coeficiente de fricción:

Tabla 8.
Rangos del coeficiente de fricción para la clasificación de los tramos

Condición	Autopistas, Corredores Carreteros, Red Básica Libre y Red Secundaria
No aceptable (pulido)	0 a 0,40
Aceptable	0,41 a 0,60
Bueno	0,61 a 0,90
No aceptable (áspero)	> 0,90

Fuente: CSV. Conservación, SCT, México.

- Macrotextura:

Tabla 9.

Intervalos de la PMT para la clasificación de tramos (México)

Estado	Intervalos de la PMT mm	
	Autopistas de Cuota y Corredores Carreteros	Red Básica Libre y Red Secundaria
Bueno	> 0,90	> 0,80
Regular	0,75 a 0,90	0,65 a 0,80
Malo	< 0,75	< 0,65

Fuente: CSV. Conservación, SCT, México.

d) En España:

- Coeficiente de fricción:

Tabla 10.

Coeficiente de resistencia en el pliego de condiciones generales y particulares (España)

CRT < 35	35#CRT < 50	CRT\$ 50
INADECUADO	SEGUIMIENTO ESPECIAL	GENERALMENTE ADECUADO

Fuente: Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, España.

- Macrotextura:

En el artículo 542 de “Mezclas Bituminosas en Caliente” (O.C 299/89T) se muestra que: "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 0.7 mm".

2.3.12 Incidencia en el riesgo de accidentes

Según el Decreto Supremo N° 005-2012-TR, el riesgo es la “probabilidad de que un peligro se materialice en determinadas condiciones y genere daños a las personas, equipos y al ambiente”, relacionando esta definición con nuestro tema, los accidentes vehiculares, se puede decir que mientras uno conduce hay un riesgo de accidente, por diferentes peligros que pueda haber en la carretera, pero que pueden ser evitados.

Según Paul Garnica, existen 3 elementos de la seguridad vial:

- Aspectos relacionados a la conducción:

El principal aspecto que un conductor debe tener en cuenta es respetar las señales de tránsito, ya que estas son herramientas que orientan e informan al conductor y así poder prevenir accidentes. Otro aspecto es la habilidad del que conduce el vehículo, ya que, si el pavimento está mojado, necesitamos reducir la velocidad, porque existe una relación directa entre la velocidad y el coeficiente de fricción, a mayor velocidad habrá menor coeficiente de fricción.



Figura 44. Vehículo en pista mojada.

Fuente: AutobildEs, 2014.

- Aspectos relacionados al vehículo:

Al momento de conducir un vehículo, debemos estar seguros de que todos sus elementos estén en buen estado, sobre todo los neumáticos que son parte importante en este capítulo. Una buena función de la macrotextura viene de la mano a un buen estado del neumático, para poder desalojar el agua, una porción de esta es gracias al dibujo de la huella del neumático que permite tomar un cierto volumen de la película de agua y expulsarla.

La banda de rodadura del neumático, es decir, la parte del neumático que entra en contacto con el suelo necesita de un tiempo para poder evacuar el agua presente en la carpeta asfáltica, por lo que, si el vehículo va a una velocidad rápida, habrá menos tiempo disponible para poder evacuar esa agua.



Figura 45. Neumático en pista mojada.

Fuente: Autos Blog México, 2020.

El rodamiento perfecto de un neumático es el preferible a la hora de conducir, la distancia recorrida debe ser proporcional al perímetro de la rueda.



Figura 46. Distancia recorrida por perímetro de rueda.

Fuente: Lesics, 2021.

En el caso de un deslizamiento completo de un neumático, ya no existe rodamiento, solo existirá una pequeña área de contacto entre neumático y pavimento, que en términos reales la distancia recorrida será menor al perímetro de la rueda, porque las condiciones de la vía son imperfectas.



Figura 47. Área de contacto neumático-pavimento.

Fuente: Lesics, 2021.

- Aspectos relacionados a la infraestructura vial:

Existen características del pavimento que se deben de tener en cuenta, donde hay estándares de diseño que son los más frecuentes:

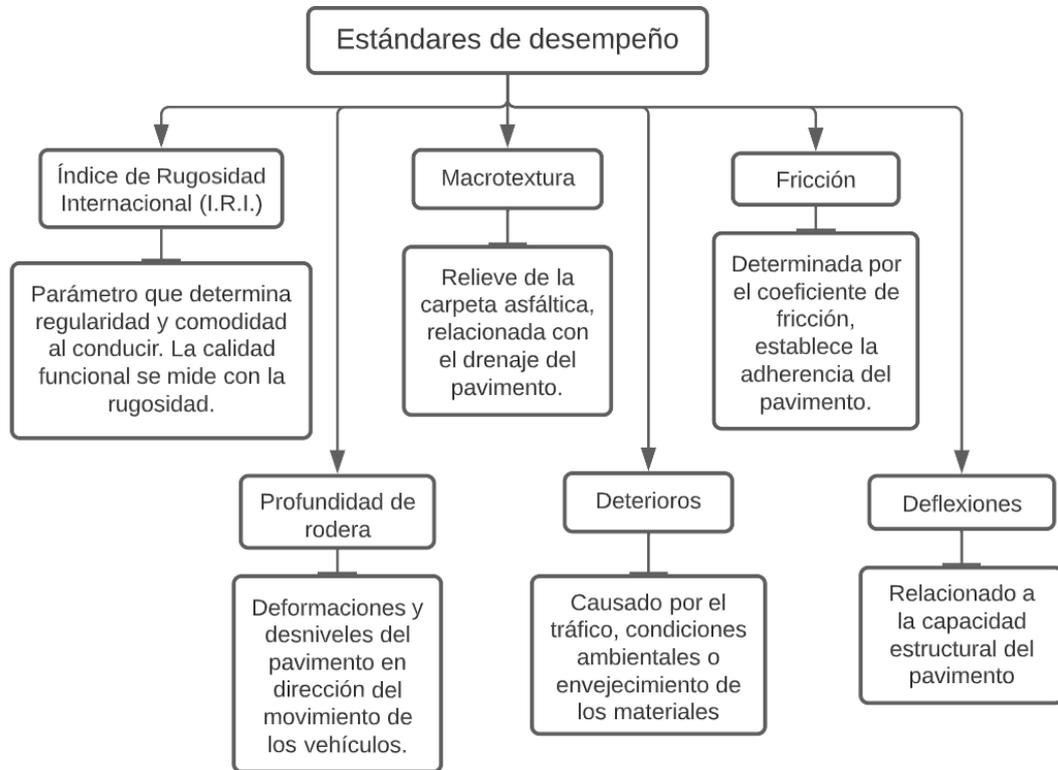


Figura 48. Estándares de desempeño en pavimentos.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.13 Hidroplaneo

El hidroplaneo (aquaplaning, hydroplaning) de los vehículos en la calzada de un pavimento es un fenómeno determinado por la pérdida completa de control direccional cuando un neumático se mueve rápido como para resbalar sobre una película de agua sin contactar el pavimento. Mientras mayor sea la velocidad del vehículo, mayor será el riesgo de hidroplaneo en condiciones de humedad. Si un neumático que rueda sobre la superficie húmeda a alta velocidad se está levantando y se desliza sobre una “cuña” de agua, respectivamente, si el neumático se separa de la superficie del camino por una película de agua cerrada esto se conoce como hidroplaneo (Justo, 2016).

El fenómeno de hidroplaneo se puede dar tanto en los automóviles como también en las aeronaves.



Figura 49. Hidroplaneo en pavimentos.

Fuente: SIIA INGENIEROS, 2017.

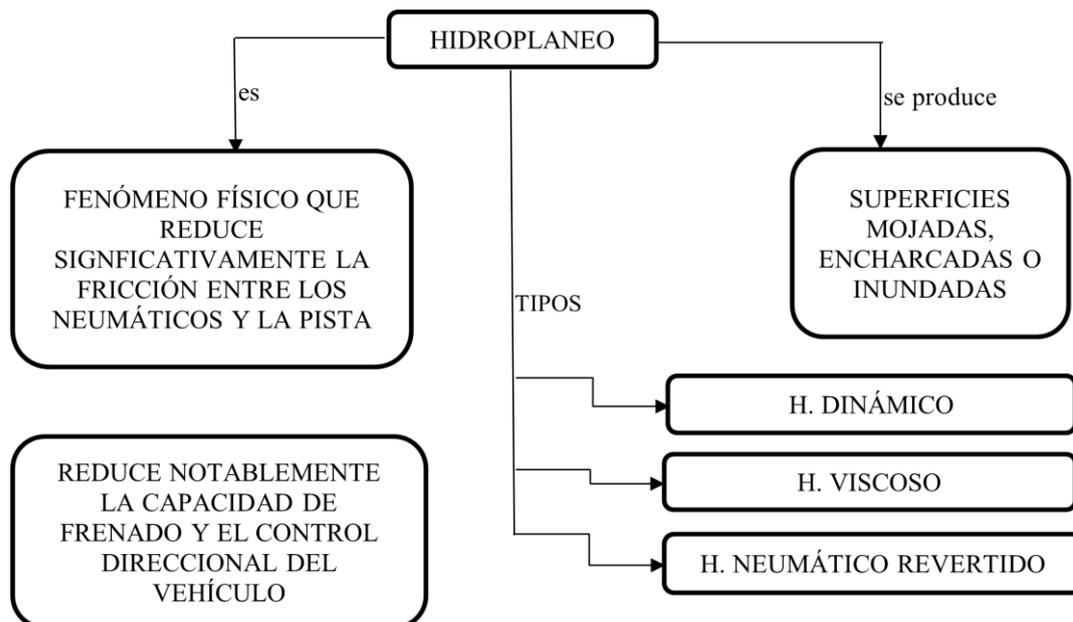


Figura 50. Hidroplaneo
Fuente: Mundo Aeronáutico.

Tipos de hidroplaneo

Existen 3 tipos de Hidroplaneo los cuales son: Hidroplaneo Dinámico, Hidroplaneo Viscoso y el Hidroplaneo de neumático revertido.

a) Hidroplaneo Dinámico

Este tipo de hidroplaneo ocurre cuando una capa de agua se interpone entre el neumático y el asfalto, haciendo que la fricción se disminuya, es el tipo de hidroplaneo más frecuente que se da en las carreteras, a continuación, se muestra cómo es que se produce este tipo de hidroplaneo. Cuando un neumático se desplaza sobre una superficie de asfalto mojada a baja velocidad, el neumático puede dispersar el agua normalmente, ósea aún mantiene el contacto con la pista y se tendrá la fricción adecuada, ver Fig.51. Pero a medida que la velocidad se incrementa el neumático empieza a tener problemas para dispersar el agua y de esta manera el agua se empieza acumular en la parte frontal y por esta razón la rueda se levanta ligeramente y así se va perdiendo de a pocos la fricción, ver Fig. 52. Por último, a velocidades muy elevadas el neumático se despegará del todo de la

superficie, pues en estas condiciones es incapaz de dispersar el agua y de esta manera se pierde totalmente la fricción entre neumático-pavimento, ver Fig. 53 (FDOT, 2020).

Baja velocidad



EL NEUMÁTICO
DISPERSA EL
AGUA
NORMALMENTE
AL PASAR

Figura 51. H. Dinámico a baja velocidad.

Fuente: Mundo Aeronáutico.

Velocidad moderada

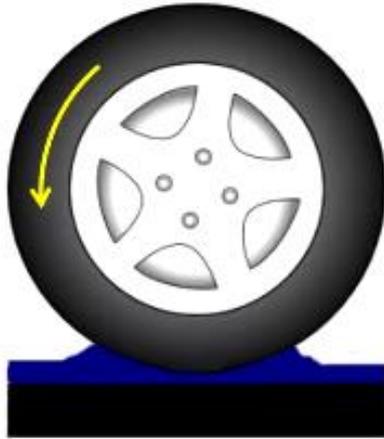


EMPIEZA ACUMULARSE
AGUA EN LA PARTE
FRONTAL,
LEVANTANDO
LIGERAMENTE EL
NEUMÁTICO

Figura 52. H. Dinámico a velocidad media.

Fuente: Mundo Aeronáutico.

Alta velocidad



EL AGUA ELEVA EL
NEUMÁTICO, EVITANDO
EL CONTACTO DIRECTO
CON LA PISTA

Figura 53. H. Dinámico a velocidad alta.

Fuente: Mundo Aeronáutico.

De esta manera se concluye que el Hidroplaneo Dinámico va a depender en parte de la velocidad que se experimente, y esta velocidad depende a su vez de la presión de inflado de los neumáticos, la cual equivale a:

$$VHP = 9 \sqrt{PSI} \quad (3)$$

Donde:

VHP = velocidad de hidroplaneo

PSI = presión de los neumáticos en psi

Es de suma importancia saber que la velocidad que se obtiene por esta fórmula es una velocidad GS (Ground Speed) o sea que es una velocidad con respecto al terreno, y no es la velocidad referenciada, pero si es la velocidad mínima para que el Hidroplaneo se inicie ya que una vez que se ha producido, este puede aún persistir hasta velocidades mucho más bajas (Mundo Aeronáutico, 2020).

b) Hidroplaneo Viscoso

Este tipo de Hidroplaneo es muy similar al hidroplaneo dinámico, pero tiene la característica de que se da a velocidades menores y en superficies lisas como por ejemplo en zonas del pavimento que están cubiertas por las marcas que dejan los neumáticos o que hayan sido pintadas recientemente, es decir en pavimentos con una mínima o casi nada de microtextura o donde la carpeta de rodadura haya sido pulido por la acción del tráfico de vehículos, por lo tanto en estas condiciones una muy fina película de agua hace que se separe el neumático del pavimento ya que hay una insuficiencia de microtextura (FDOT, 2020).

Cuando el vehículo se desplaza sobre una superficie asfáltica esta tiene unas irregularidades las cuales son la microtextura correspondiente de la capa de rodadura, entonces inclusive cuando exista una capa delgada de agua sobre la superficie, las irregularidades o mejor dicho la microtextura le permitirá al neumático una fricción adecuada y de esta manera se permite una tracción normal; pero cuando nos desplazamos por un pavimento con una carpeta asfáltica muy lisa ya que ha sido pulida con el tiempo por la acción del tráfico, esta no tendrá estas irregularidades o tendrá una microtextura casi nula lo que hará que una delgada capa de agua se interponga entre el neumático-pavimento y de esta manera se pierde la fricción, experimentando así el Hidroplaneo viscoso (Mundo Aeronáutico, 2020).

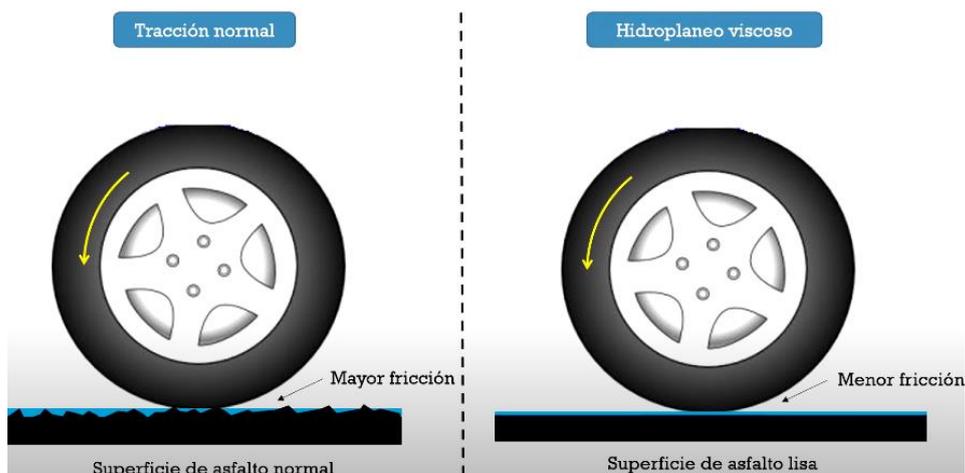


Figura 54. H. Viscoso.

Fuente: Mundo Aeronáutico.

c) Hidroplaneo de Neumático Revertido

Este tipo de Hidroplaneo no es muy común en carreteras, pero se suele dar en pavimentos con aeronaves de alta velocidad y se produce al bloquearse las ruedas durante el frenado lo cual va a generar un calor intenso hasta el punto que el material del caucho del pavimento se derrita, ya que al aplicar fuertemente los frenos las ruedas se van a bloquear y de esta manera se producirá un derrape sobre la pista, y este derrape va a producir un excesivo calor suficiente para derretir el neumático (FDOT, 2020).



Figura 55. H. Neumático Revertido

Fuente: Mundo Aeronáutico.

Entonces este derrape que produce bastante calor hace que el agua se encuentre sobre el pavimento se evapore, de esta manera se genera vapor entre el neumático y la carpeta asfáltica, y así este vapor eleva el neumático evitando así el contacto directo entre estos dos elementos, experimentando así el Hidroplaneo de neumático revertido (Mundo Aeronáutico, 2020)

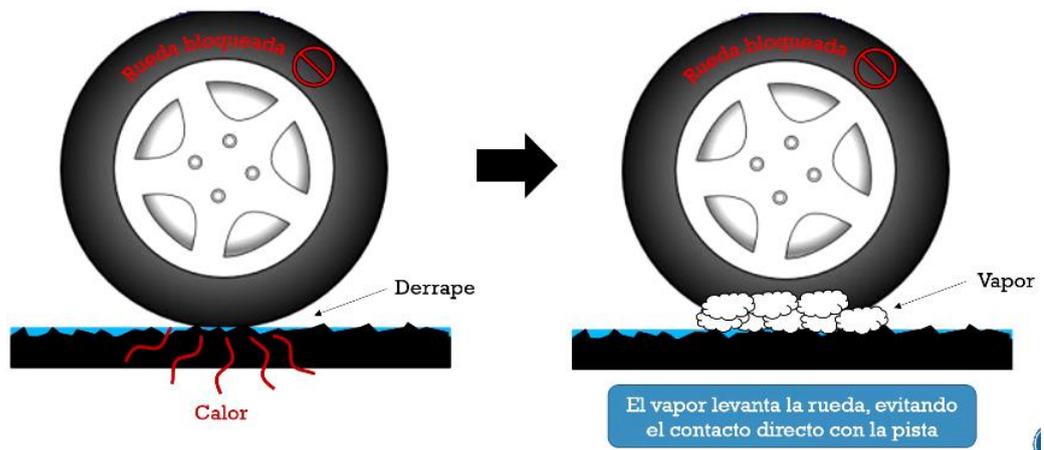


Figura 56. H. Neumático Revertido
Fuente: Mundo Aeronáutico

2.3.14 Métodos de la medición de la textura con equipos de bajo rendimiento

Se les llama así ya que las mediciones se efectúan en forma estática y el valor resultante es un valor puntual. (SCT, 2016). En esta clase de equipos podemos mencionar a dos métodos: El método volumétrico o también llamado o ensayo de Círculo de arena y el Método TRRL o Péndulo Británico.

a) Método volumétrico o Ensayo Círculo de Arena

El ensayo de círculo de arena o método volumétrico es uno de los métodos más utilizados cuando se trata de determinar la macrotextura de una superficie de rodadura, en este caso de la carpeta asfáltica ya que este ensayo se encuentra estandarizado en la norma de (ASTM) American Society for Testing and Materials (ASTM E965, 2019).

El método del ensayo consiste en extender un cierto volumen de material conocido sobre una superficie que debe encontrarse previamente libre de suciedad y completamente seca para luego medir toda el área cubierta por este material que generalmente es arena fina, para luego seguir con los cálculos del promedio de profundidad que habrá entre la parte inferior de los huecos que están en la superficie con las partes más altas de los áridos de la superficie del pavimento (MTC, 2016). Cabe resaltar que este ensayo sirve tanto como para pavimentos flexibles como pavimentos rígidos.

Internacionalmente en la actualidad hay distintos equipos de alto rendimiento para medir la micro y macrotextura y por ende la resistencia al deslizamiento, este tipo de equipos continuos nos permite efectuar las mediciones a una velocidad considerable y sin tener que detenernos y operando de esta manera se va a poder minimizar las interrupciones del tráfico durante las mediciones, así como también se alcanzan altos rendimientos en la toma de datos, de igual manera habrá una reducción inmensa de los costes asociados a las mediciones (Fleites, 2017).

A continuación, se muestra la ecuación y esquema correspondientes al ensayo del círculo de arena:

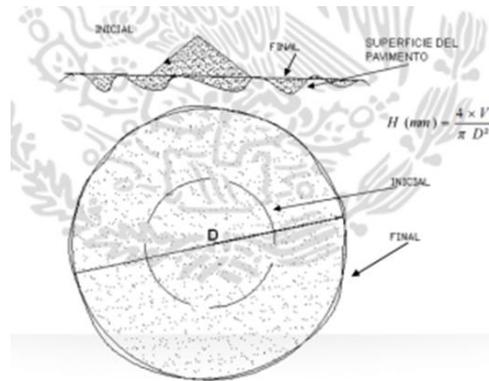


Figura 57. Esquema del ensayo del círculo de arena

Fuente: SCT, México.

$$H (mm) = \frac{4*V}{\pi*D^2} \quad (4)$$

Donde:

H: Altura (Valor de Macrotextura)

V: Volumen

D= Promedio de cuatro diámetros registrados



Figura 58. Ensayo del círculo de arena.

Fuente: Consultores del Sur GLA.

b) Método del péndulo británico o TRRL

El Péndulo británico es un equipo dinámico el cual se usa para calcular la energía perdida y a través de esta pérdida de energía en el ensayo es que se puede medir el ángulo oscilatorio del péndulo (MTC, 2016).

Para que la realización de la prueba del TRRL se lleve de la mejor manera se debe seguir un procedimiento adecuado: Nivelación (parecido a la nivelación topográfica, o sea verificar que el ojo de la burbuja niveladora esté en el centro, Ajuste a ceros (se debe corroborar que esté en cero la escala de medida) y Ajuste de la longitud al deslizamiento (INVIAS, 2014)

Existen rangos de fricción ya que las superficies donde se realicen las pruebas con el péndulo británico no siempre estarán en condiciones normales, sino que también podríamos encontrarnos en una superficie húmeda que para casos extremos sería la condición crítica del pavimento (IMT, 2014).

Tabla 11.
Rangos de fricción

FRICCIÓN	CALIFICACIÓN
0-50	Malo (derrapamiento del vehículo)
51-60	De regular a bueno
61-80	Bueno
81-90	De bueno a regular
>90	Malo (desgaste de los neumáticos)

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte.

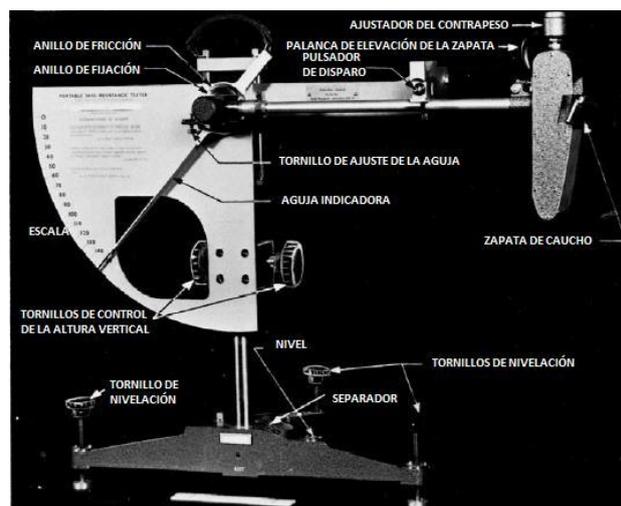


Figura 59. Péndulo británico o TRRL.

Fuente: Normas de ensayo de materiales INVIAS, 2013.

2.3.15 Métodos de la medición de la textura con equipos de alto rendimiento

Por las limitaciones que hay en los equipos de bajo rendimiento, surgen ya los equipos de alto rendimiento, estos equipos determinan la macrotextura a nivel de redes, es decir ya no estaríamos hablando de valores puntuales, aquí los equipos ya van a velocidades de operación, son mediciones dinámicas y la velocidad de la recolección de la información ya no depende tanto de estar cerrando el tráfico en un tramo, ya en este sentido los vehículos pueden ir a velocidades de operación y al mismo tiempo que van avanzando sobre la vía ir recolectando toda la información necesaria (Castro, 2021).

a) Método de Griptestester

Como sabemos hallar el valor de la macrotextura adecuada es en sí hallar el coeficiente de resistencia al deslizamiento, por eso contamos con el método del Griptestester de origen británico, es uno de los equipos más divulgados a nivel global para la medición del coeficiente de fricción, puesto que este método es útil no solo en carreteras sino también en aeropuertos, es aceptado por todo el mundo por todas las organizaciones internacionales, como por ejemplo la OACI cuando se realizan pruebas en pistas de aeropuertos y para la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras) y para la medición del Índice de Fricción Internacional (IFI) (Garrido, 2012).

El Griptestester consiste en que contiene una rueda parcialmente bloqueada y por medio de esta rueda se logra conseguir la resistencia al deslizamiento de la superficie de rodadura del pavimento, lo que hace esta rueda es que desplaza a una velocidad menor a la del vehículo que lo arrastra, estos dos componentes disponen de un sensor de fuerza, el cual va transmitiendo una señal a un computador central, así de esta manera se obtendrá este indicador (Moreira, 2012).

Este equipo del Griptestester tiene una característica que la hace muy especial, y es la de realizar mediciones en pavimento húmedo, trabaja a una velocidad de medición de 50km/h, sus neumáticos tienen una presión de 20 libras, también es remolcado por un vehículo con estanque de 800L, además

cuando se tiene la información esta es enviada a un Microprocesador del GT para luego a través de la red al computador del equipo con los indicadores correspondientes, también se le incluye los odómetros que sirven para registrar las distancias de medición (Moreira,2012).



Figura 60. Equipo Griptester.

Fuente: Introducción descripción de equipos de auscultaciones

b) Método de perfilómetro inercial

Este equipo de alto rendimiento elabora medidas automáticas y de alta calidad de un perfil de una vía determinada, hecho para realizar un análisis de la regularidad superficial de las carreteras, utilizando como parámetro de medición el índice de regularidad internacional (IRI), a través de un perfil longitudinal como uno transversal, aumentando la calidad y precisión frente a otros equipos tradicionales.

Estos equipos pueden obtener medidas continuas de perfil longitudinal de una carretera a altas velocidades, por medio de la creación de una referencia inercial, compuesto por acelerómetros que van a permitir lograr el movimiento vertical del mismo y sensores de “no contacto”, como los dispositivos láser infrarrojos, que son usados para calcular el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. (Badilla, G., Elizondo, F. y Barrantes, R., 2008).

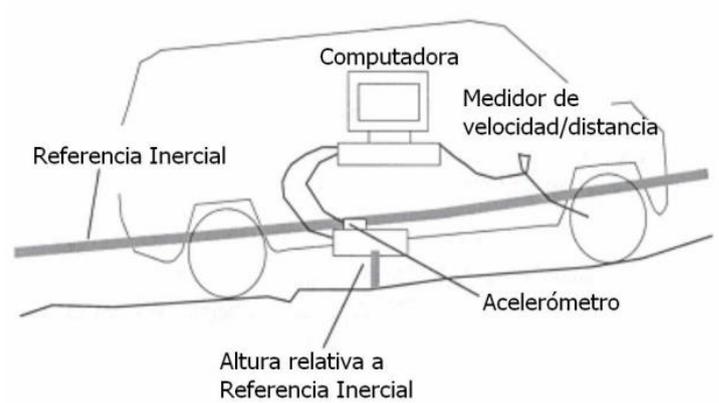


Figura 61: Principales componentes del perfilómetro inercial

Fuente: Adaptado de “The Little Book of Profiling”

Además de que nos ayude a obtener el IRI, este equipo es usado para calcular la macrotextura existente en la vía estudiada, este dispositivo va a velocidad de operación, no nos da valores puntuales, por lo que, la velocidad de recolección de datos no dependerá de cerrar el tránsito. A medida que el vehículo va avanzando, se van elaborando perfiles longitudinales. Ya obtenidos estos perfiles, los separaremos en segmentos de 100 mm y deberemos aplicarle una regresión lineal para así poderlo ajustar, eliminando la pendiente y el segmento pueda quedar con una media de cero (Castro, 2021).

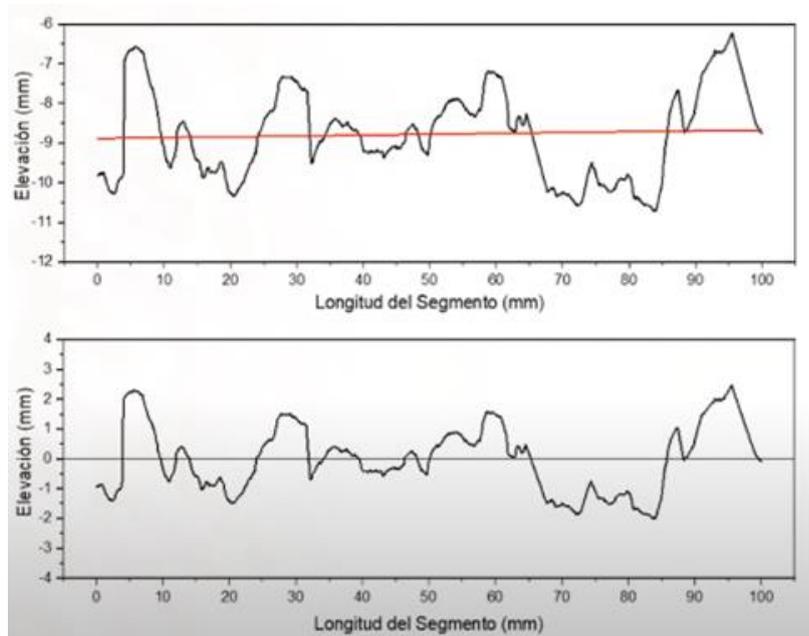


Figura 62. Segmento de 10 mm

Fuente: Castro, F.

Luego, se aplicará un algoritmo, donde el segmento se dividirá en dos, es decir, de 0 a 50 mm y de 50 mm a 100 mm, y los puntos máximos de cada nuevo segmento servirá para sacar un promedio entre estos, este valor será la profundidad media de perfil, y con dicho valor se podrá completar la ecuación con el cual vamos a poder hallar la macrotextura.

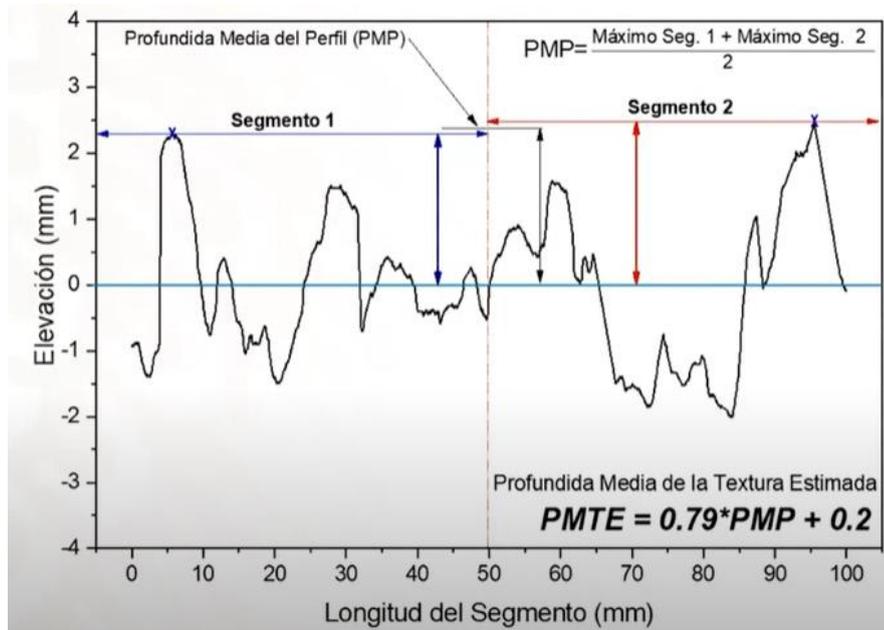


Figura 63. Cálculo de PMP y PMTE.

Fuente: Castro, F.

c) Método de texturómetro basado en visión artificial

Al existir la manera de mejorar las mediciones de la macrotextura se expone el Método de Texturómetro Basado en visión artificial con proyección de línea láser.

Este método se usa para determinar el valor de la macrotextura y trata de alguna manera simular el método volumétrico o círculo de arena, con la finalidad de tener mayor repetibilidad, confiabilidad y eliminar esos errores que pueden ser de alguna manera introducidos por el operador, la granulometría de la arena (microesfera de vidrio) y errores por instrumentos de medición (Castro, 2021).

Board (2021) señala que “el láser de tipo puntual no tiene la capacidad requerida para adquirir de manera adecuada la macrotextura longitudinal de un pavimento en comparación con los equipos de línea láser , es así que la utilización de dispositivos con línea laser es considerado como el método más adecuado para reunir los perfiles de referencia con el objetivo de validar o certificar equipos de alto rendimiento para las mediciones de la macrotextura, ya que estos dispositivos con línea láser tienen una probabilidad de repetición superior al 95% entre dos mediciones repetidas”. (Castro,2021).



Figura 64. Prototipo de texturómetro.

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

d) Equipo Mu-Meter

El Mu-Meter es un equipo que trabaja bajo el principio de rueda oblicua a diferencia del Grip tester que lo hace bajo el principio de rueda parcialmente bloqueada, este dispositivo mide la fricción continua y fue diseñado para pruebas en pistas de aterrizaje, calles de rodaje y superficies de carreteras. Las mediciones se obtienen transportando a una velocidad constante el equipo Mu-meter, ya que tiene dos ruedas de ensayo que giran libremente y estos a su vez forman un ángulo con la dirección del movimiento, pero para llevar a cabo este procedimiento el pavimento debe estar previamente humedecido y que las ruedas de ensayo tienen que estar constantemente aplicadas bajo una carga estática. De esta manera se realiza un registro gráfico continuo de la fuerza de fricción lateral y esto se hace en todo el tramo de la superficie de ensayo, para obtener promedios para cualquier tramo o longitud específica (MTC, 2016).

Hay que tener en cuenta como con todos los demás equipos mencionados que los valores medidos y procesos de medición con el Mu meter realizados por la norma no deben tener necesariamente correlación con los resultados medidos con otros equipos o métodos para la medición de la fricción de carpetas de rodadura.



Figura 65. Equipo Mu-meter.

Fuente: Instituto Mexicano del transporte.

e) Equipo SCRIM

El SCRIM es de origen británico, y es un equipo de medida de rozamiento transversal, considerado de alto rendimiento ya que es uno de los equipos más eficientes para medir el coeficiente de fricción en las carreteras, el equipo se compone de un camión equipado con una cisterna de agua, y posee una rueda de medición inclinada ubicada en el lado derecho, para que las medidas se realicen en la parte de la calzada más impuesta por el tráfico, de esta manera se le aplica una carga de 200 kg que se mueve verticalmente e independientemente de los movimientos que el camión realice, delante de la rueda se vierte agua para obtener una película líquida de espesor constante, las mediciones las realiza a una velocidad de 30 y 90 km/h. Pero no solo mide la fricción o sea la evaluación de la adherencia entre neumático-pavimento, sino que también al mismo tiempo mide la Profundidad Media de la Textura (PMT) ya que también contiene un texturómetro laser. Al obtener las medidas es de gran rendimiento y gracias a esta ventaja del equipo se puede realizar campañas periódicas a grandes redes. Así como también la intervención del tráfico del SCRIM es casi mínima o nula en algunos casos, a fin de evitar molestias a los conductores o usuarios de la vía, esto aumenta la seguridad en la realización del procedimiento del ensayo (Moreira, 2012)



Figura 66. Equipo SCRIM.

Fuente: MOP-Dirección de Vialidad.

f) Walking Profiler G3

Este perfilómetro láser es un instrumento de medida de alta precisión para la obtención de información de la superficie de rodadura. Este equipo nos da lectura del perfil del pavimento, dando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), textura MPD (opcional) y también la distancia. Los datos se recogen a velocidades variables de hasta 5km/h y se controla mediante una tablet con un sistema operativo Android. Estos resultados se muestran en tiempo real en la pantalla, lo que permite la toma de decisiones in situ. Los datos pueden descargarse a la nube mediante una conexión Wi-Fi o descargados a través de USB.

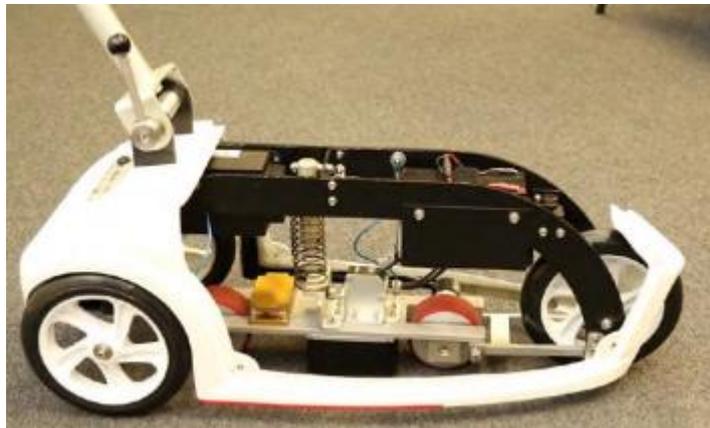


Figura 67. Equipo Walking Profiler G3.

Fuente: Mecacisa.



Figura 68. Walking Profiler G3 con tablet.

Fuente: Equipos iri.

2.4 Definición de términos básicos

Índice Medio Diario Anual (IMDA)

Es un valor numérico estimado del tráfico vehicular en un tramo de la red vial a estudiar en el tiempo de un año. El IMDA es el producto de multiplicar el índice medio diario semanal que consiste en el resultado de conteo y categorización vehicular en el lapso de una semana, por un factor de corrección que estime la actuación anualizada del tráfico (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011).

Adherencia

Es una forma de unión física entre objetos, una fuerza de atracción que mantiene unidas moléculas de diferente naturaleza química (Araujo, R., 2014).

Fricción

La fuerza de fricción es la fuerza que existe entre dos superficies en contacto, que se opone al deslizamiento (Fleites, 2017).

Algoritmo

Conjunto de instrucciones de código ordenadas para realizar una tarea o resolver un problema (Castro, F. 2021)

Sensor

Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etc.) u otras alteraciones de su entorno (SCT, 2016).

Prototipo

La primera versión de los que se desarrolla o construye. (Castro, F. 2021)

Tráfico

Es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. (UNAM, México, 2020).

Drenaje

El sistema de drenaje y subdrenaje de una carretera está hecho para eliminar la humedad en el pavimento (Sánchez, F.)

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis principal

Determinando la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos Péndulo Británico o TRRL, Círculo de Arena, SCRIM, Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro inercial, se halla la incidencia en el riesgo de accidentes.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) Con la microtextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (Péndulo Británico o TRRL) y alto rendimiento (SCRIM), incide en el riesgo de accidentes.
- b) Con la macrotextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (Círculo de Arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), incide en el riesgo de accidentes.
- c) La textura de la carpeta asfáltica, hallados con los métodos de medición, incide en el riesgo de accidentes.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y método de investigación

4.1.1 Método de investigación

El método de estudio es deductivo, ya que mediante la información de investigaciones anteriores se analizarán sus resultados obtenidos para los distintos métodos de medición de la textura de la carpeta asfáltica.

4.1.2 Orientación de investigación

La orientación de nuestra investigación es aplicada, porque del análisis de la información recopilada de métodos para determinar la textura de la carpeta asfáltica se hallará la incidencia en el riesgo de accidentes.

4.1.3 Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, porque se utilizará la recolección de datos de las investigaciones realizadas anteriormente.

4.1.4 Recolección de datos

Nuestra investigación es retrolectiva, ya que recopilaremos información, datos y valores de fuentes secundarias existentes como tesis, libros y/o artículos con fines similares al estudio.

4.1.5 Tipo de la investigación

La investigación es de tipo descriptiva, porque se realizó en base a investigaciones anteriores, con el propósito de recopilar información de los resultados obtenidos con los métodos de medición de la textura de la carpeta asfáltica para hallar la incidencia en el riesgo de accidentes.

4.1.6 Nivel de la investigación

La investigación es descriptiva, ya que está orientada a describir los métodos de medición de la textura de la carpeta asfáltica para hallar la incidencia en el riesgo de accidentes.

Además, es una investigación explicativa, porque se explica cómo los métodos de medición llegan a incidir en el riesgo de accidentes.

4.1.7 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, transversal y retrospectiva, porque se utilizaron los datos y resultados de investigaciones anteriores de mediciones de la textura de la carpeta asfáltica.

4.1.8 Población de estudio

La población de estudio de nuestra investigación es el conjunto de métodos de medición de la textura de la carpeta asfáltica.

4.1.9 Diseño muestral

El diseño muestral de nuestra investigación estará enfocado en los resultados de microtextura y macrotectura con métodos de medición.

4.2 Relación entre variables

4.2.1 Identificación de variables

Variable Independiente:

Textura de la carpeta asfáltica.

Variable Dependiente:

Incidencia en el riesgo de accidentes.

4.2.2 Operacionalización de las variables

Tabla 12.
Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICES	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTO	HERRAMIENTA	
V.I.: TEXTURA DE LA CARPETA ASFÁLTICA	Es un parámetro crítico en la comodidad y la seguridad de los usuarios, necesarios para la conservación de las carreteras. La textura influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interfase neumático-pavimento.	La textura de la carpeta asfáltica es una característica superficial de los pavimentos que se divide en microtextura y macrotextura. Los métodos de medición para la textura en el Perú según la norma MTC E 10004 se realizan a nivel de la macrotextura y microtextura de la carpeta asfáltica los cuales son considerados métodos de bajo rendimiento: Círculo de arena y TRRL. Existen métodos de alto rendimiento para la medición de la textura como la Perfilómetro inerciales, SCRIM, etc. Los métodos miden el coeficiente de deslizamiento que es la fuerza desarrollada entre la carpeta asfáltica y los neumáticos. La macrotextura son aquellos lugares donde uno puede notar las asperezas en la superficie e incide en la capacidad de drenar el agua para evitar el hidroplaneo el cual es un fenómeno causante de accidentes vehiculares.	Métodos de medición	Métodos de bajo rendimiento	TRRL	adimensional	Cuantitativa retrolectiva	Formato de campo	Normativa Nacional: Norma MTC E 1004	
					Círculo de arena	adimensional				
				Métodos de alto rendimiento	SCRIM	adimensional				Normativa internacional: Norma ASTM E965
					Texturómetro basado en visión artificial	adimensional				
					Perfilómetro Inercial	adimensional				

			Resistencia al deslizamiento	Microtextura	Adherencia	mm (milímetros)	Cuantitativa retrolectiva		
				Macrotextura	Drenaje				
V.D.: INCIDENCIA EN EL RIESGO DE ACCIDENTES	Un incidente es un evento relacionado con el trabajo, en el que ocurre, o puede ocurrir un daño. Se puede evitar un incidente a través de medidas de control y así moderar el riesgo de accidentes que pueden ser: Bajo, Medio y Alto.	La carpeta asfáltica está sujeta a variaciones estacionales, y con el tiempo los agregados incrustados se pulen debido a la avalancha de tráfico. Existe un riesgo de accidentes por la textura de esta superficie el cual se da en climas húmedos, por lo cual la superficie del pavimento se vuelve peligrosa ya que se produce el Hidroplaneo.	Control del riesgo de accidentes vehiculares	Tráfico	Continuidad	adimensional	Cuantitativa retrolectiva	Formato de campo	IMDA
				Hidroplaneo	Humedad	adimensional			Data de accidentes

Fuente: Elaboración propia

4.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En este trabajo de investigación se usaron técnicas de recopilación de datos basados en tesis anteriores, libros, guías normas y manuales. Los instrumentos de recolección de datos fueron investigaciones con resultados de mediciones de textura de la carpeta asfáltica

4.4 Procedimientos para la recolección de datos

El procedimiento de esta investigación consta de la recopilación de fuentes secundarias, es decir, normas, tesis pasadas, papers.

4.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Las técnicas de procesamiento y análisis de datos de nuestra investigación están basadas en recopilar, analizar y establecer si los métodos de medición de la textura inciden en el riesgo de accidentes.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1 Diagnóstico y situación actual

De acuerdo con lo estudiado podemos decir que actualmente en el Perú y según los reglamentos del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) las mediciones de la macrotextura y microtextura de la carpeta asfáltica se realizan mediante dos ensayos los cuales son: Circulo de Arena y TRRL respectivamente. Siendo estos equipos considerados de bajo rendimiento, pero aceptados internacionalmente por muchos países en el mundo.

El ensayo del Círculo de Arena o llamado también método volumétrico es un ensayo que se usa a nivel nacional e internacional ya que es la técnica base como referencia, pero es estática y puntual y no podríamos medir toda una red puesto que nos tomaría mucho tiempo en realizar las mediciones, ya que una medición de este tipo lleva 5 minutos con un personal experto, donde ya tenga todas sus herramientas y las condiciones para la realización de la prueba. Por lo cual al ser este ensayo puntual y estático la NCHRP (Programa Nacional de Investigación Cooperativa de carreteras) en el año 2021 en una de sus publicaciones sobre mediciones de macrotextura a nivel de red, por esta razón nos recomienda y nos invita a utilizar nuevos equipos o dispositivos donde la tecnología sea determinante para las mediciones, y ya empezar a dejar de lado el ensayo del Círculo de Arena.

De la misma manera para el equipo del TRRL o Péndulo Británico que si bien es cierto es un equipo dinámico no deja de ser puntual, además de ser utilizado sobre la mezcla asfáltica una vez que ya haya sido puesta en obra. Pero no se contaba con ningún método que pueda realizar las mediciones antes de su puesta en obra y que a su vez ya no sean puntuales, sino a nivel de red y a una mayor velocidad de medición. Por esta razón se han desarrollado distintos equipos de medición de alto rendimiento que pueden realizar todo lo requerido para un mejor cálculo y obtención de datos de la microtextura y por ende la resistencia al deslizamiento, como por ejemplo que se pueda estudiar y medir la evolución en el tiempo de la resistencia al deslizamiento y la resistencia al pulimento.

5.1.1 Microtextura

Existen diferentes equipos para su medición dentro de la carpeta asfáltica, ya que es necesario que haya una buena microtextura la cual depende de la aspereza de las partículas minerales, aquellos que dan la cara a la superficie por así decirlo, no obstante cualquier partícula mineral en principio tiene de entrada una suficiente aspereza, pero el problema es que por la acción repetida de los neumáticos, es decir de la interfaz neumático-pavimento, tiende a perderse esta aspereza con mayor o menor velocidad, tales como los agregados calizos que son muy pulimentables, por ende tienden a perder la aspereza necesaria que la microtextura requiere, por eso que en las capas de superficie el agregado grueso tiene que tener una aspereza que a pesar de la acción de los neumáticos de los vehículos se mantenga a lo largo del tiempo.

5.1.2 Macrotextura

Al igual para la macrotextura se cuenta con muchos equipos hoy en día para sus cálculos y mediciones, en esta fase de la textura los parámetros de coeficiente de fricción, ruido el cual es generado por la interacción neumático-pavimento, hidroplaneo o también llamado aquaplaning y la resistencia al deslizamiento son afectados directamente por la macrotextura, es por ello que la macrotextura es considerada a nivel global la fase más importante de la superficie de rodadura del pavimento porque de esta depende la seguridad de todos los usuarios que transitan sobre las carreteras.

La macrotextura se considera a nivel internacional como el parámetro más importante de la carpeta asfáltica, ya que gracias a esta fase de la textura depende la seguridad de los usuarios que circulan por la superficie de rodadura, sobre todo bajo condiciones de pavimento húmedo o al transitar en épocas de lluvia. Por lo tanto, lo que se busca es que la carpeta asfáltica tenga una macrotextura gruesa o rugosa y que la microtextura sea áspera, esto hace que estas irregularidades sean deseables para los ingenieros ya que contribuyen a la resistencia al deslizamiento y a la prevención de los accidentes vehiculares, en la fig. 69 podemos observar las 4 posibles combinaciones de la micro y macrotextura.

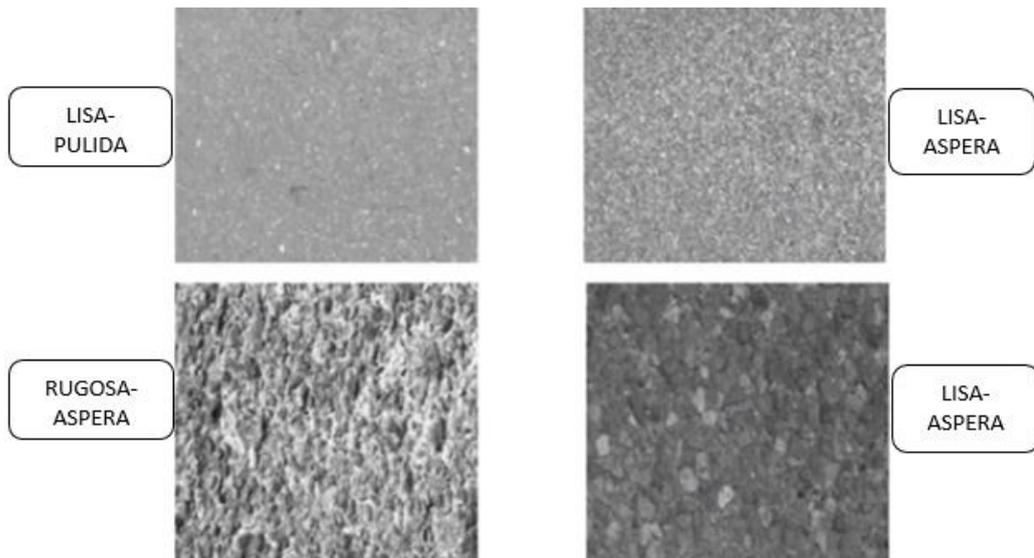


Figura 69. Posibles combinaciones de Macro y Microtextura.

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia

5.1.3 Contexto de Microtextura y Macrotextura

Es importante comprender el contexto en el cual se hacen las evaluaciones, pues como podemos observar en la fig. 70 las mediciones se desarrollan en las diferentes longitudes de onda, por esta razón saber en qué contexto es que se pueden utilizar los equipos de medición correspondientes y en dónde se evalúa la textura.

Por eso se muestra la siguiente presentación con las distintas fases para un mejor entendimiento.

En un inicio podemos decir que hay una zona A que sería como la zona ideal, la cual es una superficie plana, y la llamamos ideal porque es imposible lograrlo. La siguientes zonas serían las zonas B y C, las cuales están asociadas a las fases de la microtextura y macrotextura, y como ya se mencionó antes estos parámetros tienen una íntima relación con la seguridad durante la circulación de los vehículos, y cuando haya valores bajos tanto de macrotextura y microtextura conllevará a posibles riesgos de accidentes e incrementos relacionados a la seguridad vial.

Cuando no encontremos en la zona D y E, ya nos referimos a la megatextura y de las Irregularidades, aquí ya estamos hablando de una zona donde tenemos por ejemplo entre 1,2 hasta 20 cm, los cuales ya son incidentes de riesgo vehicular. Para la zona F nos referimos al perfil vertical, el cual correspondería a las curvas verticales, peraltes, etc.

Entonces como podemos ver es de suma importancia el saber dónde nos encontramos y que nos sirve para definir donde deberíamos utilizar los equipos correspondientes, además de qué tipo de equipo usar.

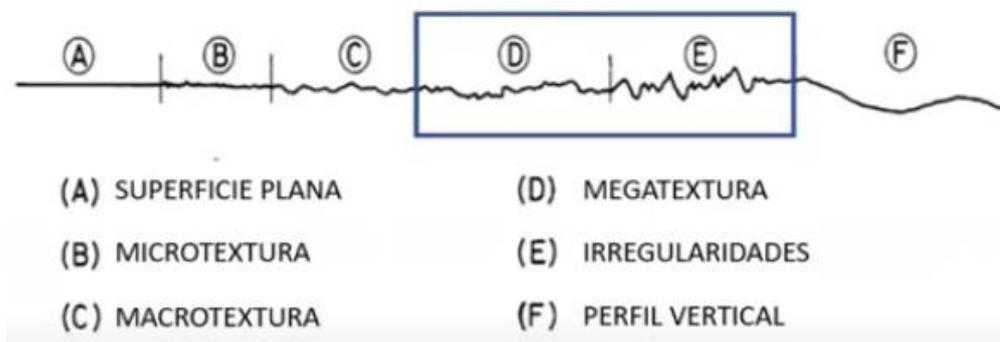


Figura 70. Contexto de Textura.

Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Zonas de medición de macrotextura, microtextura y fricción

Para nuestra investigación es importante saber dónde se deben realizar las mediciones o en que zonas de la sección de la vía, y esto nos da las normativas ya que está especificado ahí, entonces se deben realizar en las zonas de los carriles ya que estas zonas son las que están directamente afectadas por la interfaz neumático-pavimento, es decir las zonas de rodadura por donde transitan los vehículos, por ende las zonas donde hay mayor desgaste y los valores son críticos, es por eso importante resaltar este detalle ya que pueden existir malos manejos en la operación de los equipos, como por ejemplo puede ser que empiecen a medir entre las zonas de rodadura, y como podemos darnos cuenta es una zona donde los valores son elevados ya que no es practicante por donde hay mayor porcentaje de circulación de los vehículos, o también pueden hacer mediciones en las zonas laterales que puede ser la berma y aquí también los valores de medición son altos, y son valores altos ya que la concentración

de mayor desgaste está en las zonas de rodadura. Pero no necesariamente sea negativa la operación porque nos puede servir como tasa de variación en el tiempo, puesto que al hacer mediciones en la zona central podemos obtener un diferencial con la zona óptima de medición que sería la de roderas, por ejemplo cuando hagamos medición de macrotextura en ambas zonas obtenemos un diferencial de Macrotextura que nos indicara en el tiempo con que velocidad se está perdiendo los valores de este parámetro y de esta manera se podría anticipar a posibles problemas de no cumplimiento de esta condición que debe tener la carpeta asfáltica (Garnica, 2021).

Por lo tanto es en estas zonas son donde nos importa obtener los valores de Macrotextura, Microtextura o Fricción para por realizar un adecuado análisis y toma de datos (Ver figura N° 71).



Figura 71. Zonas de medición.

Fuente: Paul Garnica (2017).

5.1.5 Normativa para determinar el valor de Macrotextura

- Normativa Internacional

Cuando se habla de macrotextura en pavimentos, es muy conocido internacionalmente por la importancia que representa en la ingeniería vial, por tal razón podemos hallar normativa internacional para la determinación de los parámetros. De acuerdo con los estándares internacionales podemos mencionar la siguiente normativa.

ASTM E965 - Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth

Using a Volumetric Technique.

Es la norma para el Método de prueba estándar para medir la profundidad de la macrotextura del pavimento utilizando una técnica volumétrica.

Este método de prueba describe un procedimiento para determinar la profundidad promedio de la macrotextura de la superficie del pavimento mediante la aplicación cuidadosa de un volumen conocido de material en la superficie y la medición posterior del área total cubierta. La técnica está diseñada para proporcionar un valor de profundidad promedio solo de la macrotextura del pavimento y se considera insensible a las características de la microtextura del pavimento. Los resultados obtenidos usando este procedimiento para determinar las profundidades promedio de la macrotextura del pavimento no necesariamente concuerdan o se correlacionan directamente con los obtenidos por otros métodos de medición de la macrotextura del pavimento. Los valores indicados en unidades de pulgada-libra deben considerarse como estándar. Los valores dados entre paréntesis son conversiones matemáticas a unidades SI que se proporcionan únicamente a título informativo y no se consideran estándar (ASTM E965, 2019).

ASTM 2380/E2380M - Standard Test Method for Measuring Pavement Texture

Drainage Using an Outflow Meter.

Es la norma para el Método de prueba estándar para medir el drenaje de la textura del pavimento usando un medidor de flujo de salida.

Este método de prueba cubre la conectividad de la textura en relación con la capacidad de drenaje del pavimento a través de sus vacíos superficiales y subterráneos. Este es un dispositivo específico que calcula el tiempo que tarda una cantidad conocida de agua, bajo la fuerza de la gravedad, en escapar a través de los vacíos en la textura del pavimento de la estructura que se está probando. La técnica está destinada a proporcionar una medida de la capacidad del pavimento para aliviar la presión de la cara de los neumáticos de los vehículos y, por lo tanto, una indicación del potencial de hidroplaneo en condiciones húmedas. Un tiempo de escape más rápido indica que puede existir una película más delgada de agua entre la llanta y el pavimento, por lo que podría exponerse más microtextura para indentar, o sea hacer espacio la cara de la llanta y más superficie de fricción disponible para la llanta. Cuanto menor sea el número de segundos que se tarda en evacuar el agua, menor será la presión del agua debajo del neumático (ASTM E2380, 2019).

ASTM E2157 - Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Properties

Using the Circular Track Meter.

Es la norma para el Método de prueba estándar para medir las propiedades de la macrotextura del pavimento utilizando el medidor de vía circular.

Este método de prueba cubre el procedimiento para obtener y analizar los perfiles de macrotextura del pavimento utilizando el medidor de vía circular (medidor CT). El medidor CT consta de un sensor de desplazamiento láser con dispositivo de carga acoplada (CCD) que está montado en un brazo que gira de manera que el sensor de desplazamiento sigue una pista circular que tiene

un diámetro de 284 mm. El medidor CT se puede usar tanto para investigaciones de laboratorio como en el campo en superficies pavimentadas reales (ASTM E2157, 2019).

- Normativa Nacional

De la normativa peruana para la determinación de la macrotextura en pavimentos, podemos hacer referencia a los siguientes documentos que han sido elaborados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) con la finalidad de homologar y establecer los lineamientos nacionales en temas de macrotextura, todos ellos adaptados a las necesidades del país, sin dejar de lado los estándares internacionales.

MTC E 1005 - MTC E 1004(para resistencia al deslizamiento)

5.1.6 Ventajas y desventajas en la Macrotextura y Microtextura

Si bien es cierto lo que se busca en los pavimentos es que la carpeta asfáltica tenga una adecuada textura óptima para un adecuado funcionamiento. Pero, así parezca ser ventajosa también un exceso traería desventajas, tales como: Si la macrotextura obtiene un mayor valor será mucho mejor para la capacidad de drenaje o evacuación de agua en la interacción neumático-pavimento, pero al ser muy alto el valor de la macrotextura conlleva a que exista un elevado nivel de ruido, de igual manera para la microtextura al tener un mayor valor de este pues se obtendrá una mejor adherencia entre la interacción neumático-pavimento, pero esto va a producir que haya un mayor desgaste en los neumáticos (Fleites, 2017).

5.1.7 Eventos de accidentes de tránsito por hidroplaneo en el Perú

Según el Anuario Estadístico Policial 2021, se registraron 74624 accidentes de tránsito a nivel nacional durante el periodo del año 2021, donde las principales causas que originaron estos accidentes fueron: exceso de velocidad, imprudencia del conductor, ebriedad del conductor, etc., dentro de este número de accidentes hubo un total de 3032 fallecidos, una cantidad promedio de lo que se viene dando en los últimos años en el Perú.

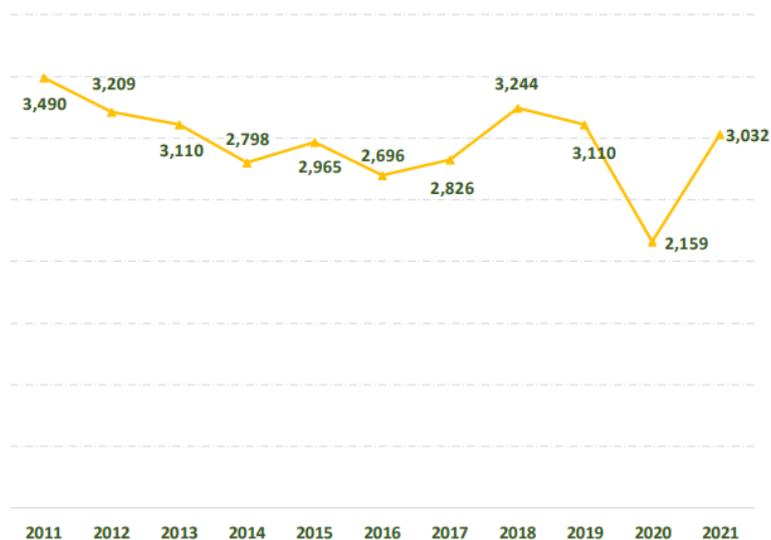


Figura 72. Tendencia de fallecidos en accidentes de tránsito en Perú (2011-2021)

Fuente: Anuario Estadístico Policial (2021).

A diario escuchamos sobre accidentes de tránsito, donde otra causa es común en ciertos sectores del Perú, que es por pista mojada, que, junto a la excesiva velocidad, han causado múltiples accidentes mortales. A continuación, se presentarán algunos accidentes ocurridos en los últimos años:

- a) El 27 de diciembre del 2020, en el kilómetro 156 de la Carretera Central, dos taxis colectivos impactaron produciendo la muerte de siete (7) personas, incluidas la vida de 2 menores de edad. Agentes de la Policía trasladaron a los heridos al hospital de EsSalud de La Oroya. La alta velocidad y la lluvia habrían sido lo factores que originaron el fatal accidente.



Figura 73. Accidente de tránsito Carretera Central.

Fuente: Policía Nacional del Perú. (2020).

- b) El pasado 8 de febrero del 2022, en el departamento de San Martín, se produjo un choque de dos camiones pesados, impidiendo el tránsito durante varias horas de los demás vehículos, la principal razón fue por la pista mojada producto de una intensa lluvia.



Figura 74. Accidente de tránsito San Martín.

Fuente: Genios Televisión. (2022).

- c) El 17 de agosto del 2022 se registró un choque con un muro de contención por parte de un camión en la Vía de Evitamiento, donde el conductor perdió el control de su vehículo ya que patinó por la pista mojada producida por una llovizna. Minutos después se registró otro accidente en el mismo punto por una camioneta, pero tampoco sin heridos ni víctimas.



Figura 75. Accidente de tránsito en Vía de Evitamiento.

Fuente: RPP. (2022).

5.2 Factores de incidencia en el Riesgo de accidente

Al realizarse las mediciones de la microtextura y macrotextura con los equipos de bajo rendimiento y alto rendimiento podemos identificar los factores que inciden en el riesgo de accidentes como lo son la adherencia y el drenaje, respectivamente.

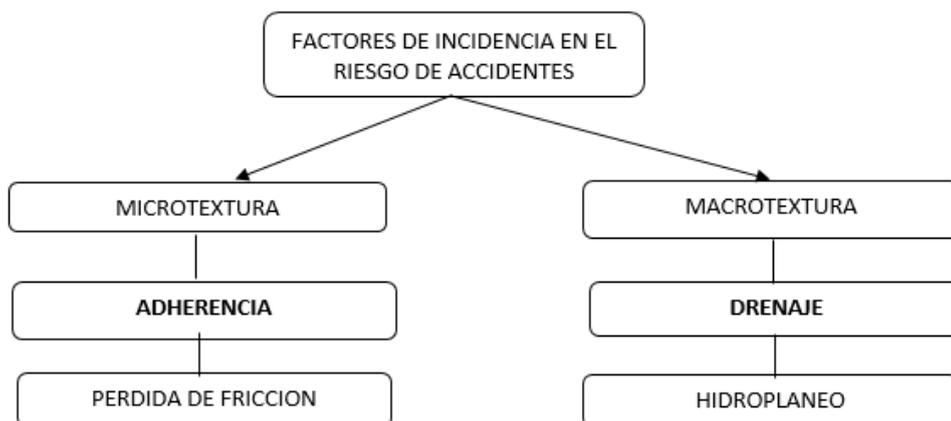


Figura 76. Factores de incidencia en el riesgo de accidentes.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Adherencia

La adherencia entre la interfaz neumático-pavimento se da a nivel de la microtextura, la cual es muy importante para la seguridad vial, este es uno de los factores de incidencia en el riesgo de accidentes, ya que si la carpeta asfáltica cuenta con una buena microtextura optima tendrá una buena adherencia entre neumático-pavimento y por ende habrá una buena resistencia al deslizamiento, entonces el frenado de los vehículos será el correcto.

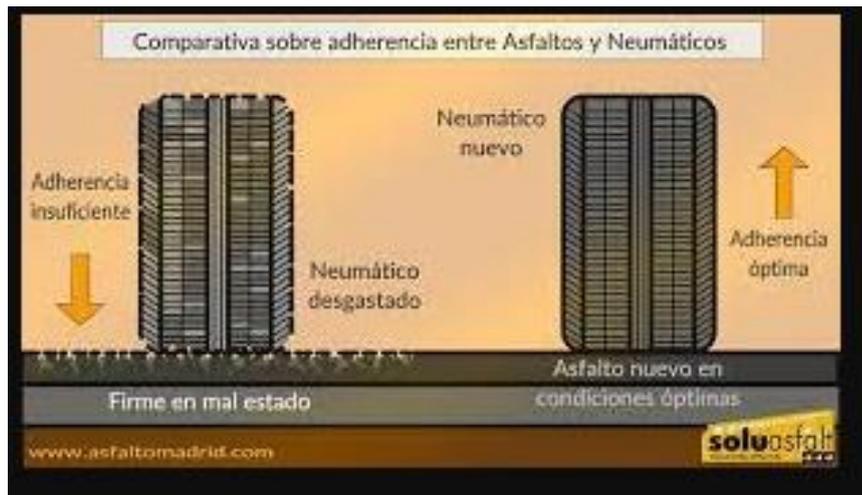


Figura 77. Adherencia entre asfalto y neumático.

Fuente: Asfaltomadrid

Factores que afectan la adherencia neumático-pavimento

Existen muchos factores que afectan la resistencia al deslizamiento de la carpeta asfáltica desde el usuario que conduce el vehículo y por ende el encargado de direccionar y maniobrar, hasta la calidad del agregado que conforma la carpeta de asfáltica. En la tabla siguiente se muestra los posibles factores que influyen en el riesgo de accidentes y la seguridad vial (Mundaca, 2019)

Características superficiales del pavimento	Parámetros de operación del vehículo	Propiedades del neumático	Factores climáticos
<ul style="list-style-type: none"> • Microtextura • Macrotextura • Megatextura • Propiedades del material • Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de deslizamiento • Velocidad del vehículo • Acciones de frenado • Maniobras de conducción • Giros • Alcances 	<ul style="list-style-type: none"> • Huella • Diseño y condición • Composición y dureza del hule • Presión de inflado • Carga • Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Clima <ul style="list-style-type: none"> ○ Viento ○ Temperatura ○ Agua (lluvia, condensación) ○ Nieve y hielo • Contaminantes <ul style="list-style-type: none"> ○ Material antiderrapamiento (sal, arena) ○ Polvo, lodo

Figura 78. Posibles factores que influyen en la seguridad vial.

Fuente: Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregado. (Flores, M. Gómez, J, Garnica)

Si se requiere que la superficie de rodadura brinde adecuadas características para la seguridad vial a cualquier velocidad, esta debe estar dotado de un adecuado sistema de drenaje superficial el cual lo provee la macrotextura y una buena microtextura para una buena adherencia y esta dependerá de la aspereza y desgaste del agregado (Mundaca, 2019).

5.2.2 Drenaje

El drenaje es muy importante para la superficie de rodadura, ya que al haber una buena evacuación de aguas ya sea por lluvias o por cualquier otro factor, evitara el fenómeno de Hidroplaneo, el cual consideramos como uno de los factores de incidencia en el riesgo de accidentes, ya que si la carpeta asfáltica cuenta con una buena Macrotextura optima tendrá un buen drenaje de las aguas superficiales, es decir si la macrotextura obtiene un mayor valor será

mucho mejor para la capacidad de drenaje o evacuación de agua en la interacción neumático-pavimento.

En la superficie del pavimento:

Para la condición geométrica del agregado, cuando tenga mayor angulosidad brindará una mejor macrotextura. Y en cuanto a la naturaleza de los agregados, las superficies de rodaduras lisas pueden ser recubiertas con una película de asfalto, pero es mucho mejor en superficies rugosas ya que allí la película de asfalto se adhiere efectivamente. Y un agregado de forma angulosa brindará una macrotextura y hará que haya un mejor drenaje del agua superficial y de esta manera evitara el deslizamiento de los neumáticos ocasionado por el fenómeno del hidropneumático. Los granos del suelo o del agregado según su forma pueden ser redondeadas, de cantos vivos, de cantos redondeados, laminares y alargadas. Las formas de las partículas de los agregados pétreos influyen en el comportamiento físico de la superficie de rodadura (Mundaca, 2019).

Pérdida de adherencia por hidropneumático

Es muy importante el drenaje que nos da la macrotextura, ya que uno de los peligros más frecuentes que se dan en la circulación de vehículos cuando hay presencia de lluvia y esta origina charcos de agua en la superficie de rodadura, que por ejemplo puede haber sido producto de pequeños desniveles debido a que el pavimento ya tiene muchos años de servicio y pues algunos sectores donde la berma se encuentra sobre elevada y esto genera que no pueda evacuar el agua correctamente a los laterales, generándose el fenómeno del hidropneumático, el cual como se mencionó antes es cuando el neumáticos prácticamente queda suspendido sobre una película de agua que hay entre la superficie de rodadura y la zona de contacto, que es el sector del neumático que mantiene la adherencia en superficie de rodadura el cual ocasiona una pérdida total del control del vehículo, entonces el rodado saldrá descontrolado hacia la berma o peor aún y lo que ocurre con más frecuencia es que se desvíe hacia el carril contrario generándose así un riesgo concreto de colisión frontal, y este riesgo es el más peligroso y temido por todos en las carreteras, ya que se suman la velocidad, las fuerzas de choque, de esta manera generándose consecuencias muy graves y lamentablemente fatídicas (Ministerio Público La Pampa, 2019).

Por lo tanto lo que se recomienda hacer en estos casos de presencia de charcos de agua o en presencia de lluvias es disminuir la velocidad, ya que es la única manera de neutralizar este fenómeno del hidroplaneo el cual es un peligro inminente, otra manera de evitar el hidroplaneo sería aprender a maniobrar en estas condiciones de pista mojada, aunque lo más aconsejable sería que cuando este lloviendo no salir a conducir nuestro vehículo, ya que si bien es cierto nosotros al salir podemos circular con todas las precauciones e indicaciones del caso, no podremos evitar que el otro conductor pueda sufrir este fenómeno del hidroplaneo y pues que invada el carril por el cual estamos circulando (Ministerio Público La Pampa, 2019).



Figura 79. Pista mojada por lluvia.

Fuente: euro taller.

5.3 Presentación de resultados

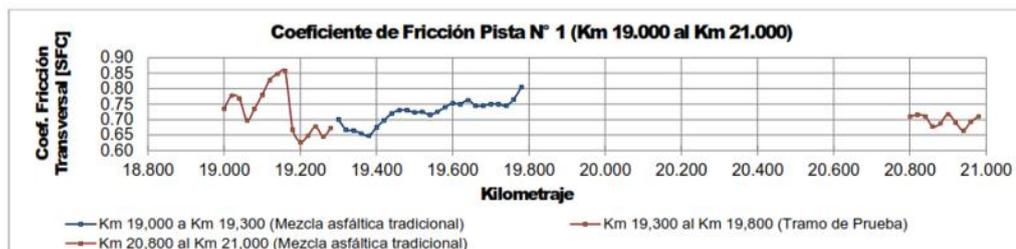
5.3.1 Interpretación de resultados de microtextura (TRRL vs. SCRIM)

Control de Coeficiente de fricción transversal (SCRIM)

Para las mediciones del coeficiente de fricción con el equipo SCRIM se realizaron en el tramo de prueba II “Mejoramiento Ruta F-50, Lo Orozco-Quilpué, Km.17.578 al Km.29.498”, estas mediciones se efectuaron el 22-05-2013 luego de seis meses del término de la construcción del tramo de prueba y para hacer una comparación también se realizaron mediciones en dos sectores con mezcla asfáltica tradicional (Km 19.000 al Km 19.300 y Km 20.800 al Km 21.000) (Navarro, 2013).

En las siguiente figura, se entregan los resultados de las mediciones del coeficiente de fricción correspondientes a la pista N° 1 y a la pista N° 2, procesados cada 20m.

• Pista N° 1



• Pista N° 2

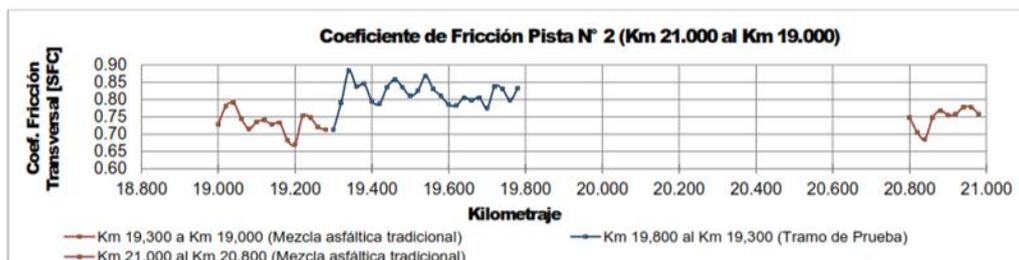


Figura 80. Resultados de mediciones de coeficiente de fricción

Fuente: Navarro, N. (2013).

Podemos observar en los cuadros de la fig. 80 hay diferencias considerables entre los valores hallados en los tramos de cada tipo de mezcla asfáltica, ya que en el Tramo de Prueba los valores varían entre 0.60 a 0.80SFC en la pista N° 1 y entre 0.75 a 0.90SFC en la pista N° 2; y en cuanto a los resultados obtenidos del pavimento con mezcla asfáltica tradicional varían entre 0.60 a 0.85SFC en la pista N° 1 y entre 0.65 a 0.80SFC en la pista N° 2.

Cabe resaltar que las zonas de bajos valores de coeficiente de fricción, se dan particularmente en las zonas de las juntas transversales, ya que allí se produce el cambio en el tipo de mezcla asfáltica utilizada en la superficie de rodadura. Esto sucede porque son zonas que requieren gran cantidad de pasadas de rodillo para lograr que la capa de rodadura quede lo más pareja y continua posible, para que de esta manera no se note el cambio entre los pavimentos adyacentes. No obstante, el exceso de rodillada disminuye considerablemente el contenido de huecos en la carpeta asfáltica, y esto puede provocar afloramientos de asfalto en la superficie, y así habrá una disminución de la fricción del neumático con la superficie.

Control de Coeficiente de fricción péndulo TRRL

Se controla también el coeficiente de fricción en condición húmeda con el Péndulo Británico TRRL, cuyo procedimiento de ensayo y evaluación está normado en 8.502.16 del M.C.-V.8. Las mediciones se realizan en forma puntual en ambas pistas; el 22.04.2013 en la Pista N° 1 y el 23.04.2013 en la Pista N° 2, aproximadamente cinco meses después del término de la construcción del Tramo de Prueba.

Para fines comparativos, estas se efectúan tanto en el Tramo de Prueba (Km 19.300 a Km 19.800), a intervalos de 100m (cada medida es representativa de 100m), como en un sector del Contrato con la mezcla asfáltica tradicional (se realiza una sola medida en el Km 20.950, representativa del subtramo entre el Km 20.900 y el Km 21.000). El ensayo se ejecuta en la huella externa, en los mismos puntos donde se extrajeron los testigos. El resultado de la medición entrega el valor BPN (British Pendulum Number), sin embargo, la medida se debe informar en forma de Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento (CRD = BPN/100).

5.3.2 Interpretación de resultados de macrotextura (Círculo de Arena vs. Texturómetro)

El prototipo de texturómetro consta de una serie de diseños que se tuvieron que realizar para lograr un prototipo funcional, herramientas de Hardware, herramientas de procesamiento, herramientas de edición, componentes electrónicos, elementos para poder visualizar toda la información, dentro del software se utilizaron herramientas o librerías de software libre que no tienen un costo alguno, se tuvo que desarrollar alguna parte de electrónica, dentro de las técnicas para manufactura se usaron técnicas de control numérico, cortes en laser, impresión aditiva que tiene que ver con la impresión en 3D en plásticos en este caso, y también se usaron algunas técnicas de visión artificial para poder hacer la reconstrucción de toda la superficie y poder tener un prototipo funcional que sea confiable para la recolección del valor de la macrotextura (Castro, 2021).

Acudiendo a documentos internacionales en el año 2021 la NCHRP (Programa Nacional de Investigación Cooperativa de carreteras) lo que hizo fue publicar un documento donde especifica la parte de medición de la macrotextura a nivel de red y cómo tenían que llevarse a cabo los procesos para la verificación de los equipos de alto rendimiento, algunas de las propuestas que nos hace es que la macrotextura con un tipo de escáner tiene que realizarse a 45° respecto a la dirección de avance de los equipos, entonces para este caso en particular las mediciones se siguieron esas recomendaciones, también nos dice que este tipo de escáner o escáner de proyección de línea láser que es el prototipo que se desarrolló nos sirven para la certificación y verificación, ya no recomienda laser puntuales, ya de alguna nos recomienda utilizar nuevos dispositivos donde la tecnología ya tenga que ser determinante y empezar a desechar la técnica volumétrica o círculo de arena (Castro, 2021).

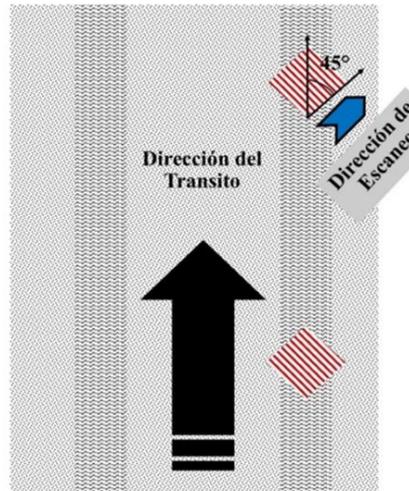


Figura 81. Dirección de escaneo

Fuente: Programa nacional de investigación cooperativa de carreteras

Entonces en ese sentido como podemos ver en la Figura 82 podemos ver algunos de los algoritmos que se implementaron para obtener el valor de la textura, en sí es una proyección de línea láser que va recorriendo cada milímetro hasta escanear una sección de 100mm x 100mm, es decir se va a tener 100 perfiles de un punto escaneado, en ese sentido como se calcula la macrotextura o la PMT (Profundidad Media de la Textura) pues se realizará un promedio de todos esos segmentos escaneados. (Castro, 2021).

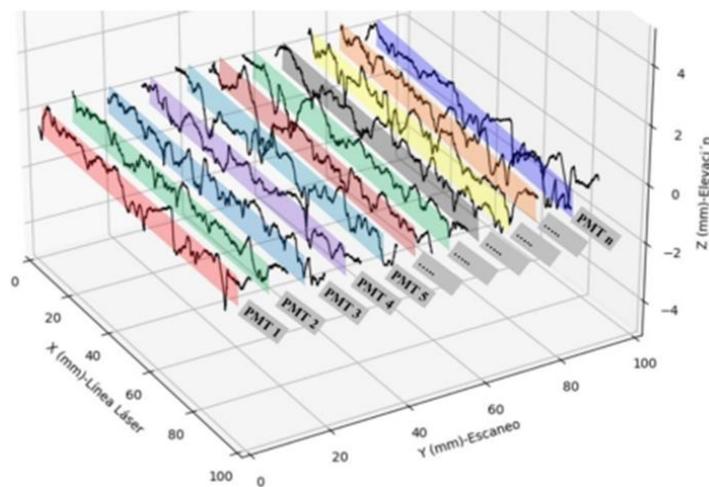


Figura 82. Cálculo de la PMT para un punto escaneado

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

Algoritmos Propuestos

a) Propuesta Algoritmo 1

Se propusieron diferentes algoritmos de los cuales dos de ellos son los que ya indica la normativa que es el segmento de 100 mm, obtener el PMP y PMT. Posteriormente se propusieron otros 5 algoritmos, donde el primero de ellos es encontrar toda el área que se encuentra sombreada, digamos del perfil tenemos un nivel de 0, tenemos el perfil de la superficie y encontramos el área sombreada, esa área sombreada dado que se conoce la longitud que es de 100mm podemos hacer un área equivalente como si fuera de un rectángulo, entonces finalmente la macrotextura es aquella área sobre 100mm y ese se reporta como valor de macrotextura (Castro, 2021).

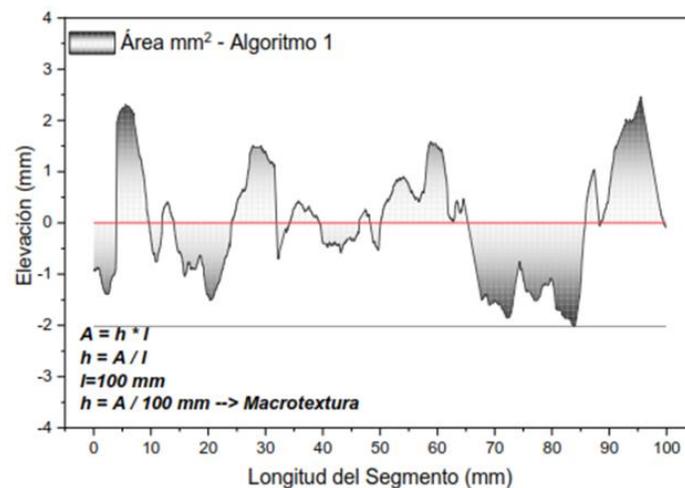


Figura 83. Propuesta de Algoritmo 1

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

b) Propuesta Algoritmo 2

Este algoritmo tiene que ver con encontrar cuatro valores máximos en ese mismo perfil, desplazar para que ese valor promedio quede en cero, entonces en algunos casos los segmentos o picos nos van a quedar en la parte superior del valor de 0 y otros por la parte inferior, este segundo algoritmo lo que hace es restar el área 1 menos el área 2, y lo que se hace al igual que el algoritmo 1, el área obtenida sobre 100mm y ese se reporta como valor de macrotextura (Castro,2021).

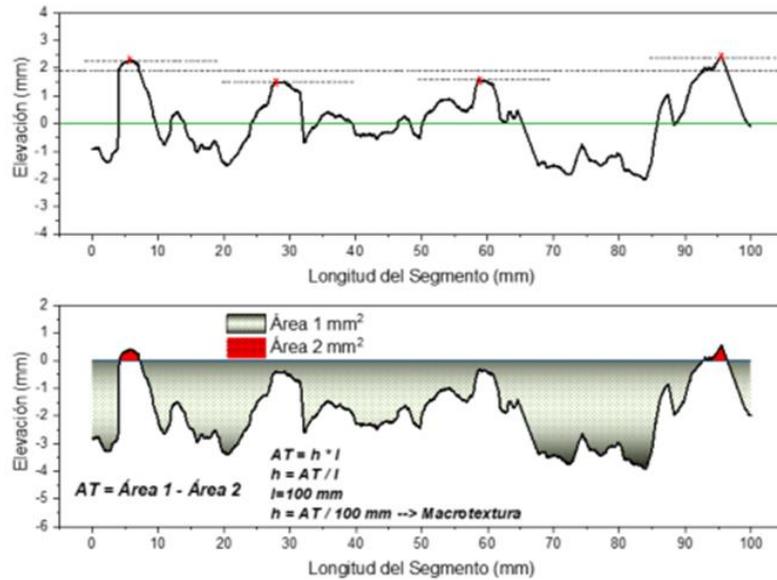


Figura 84. Propuesta de Algoritmo 2

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

c) Propuesta Algoritmo 3

Para el tercer algoritmo es la misma técnica del anterior, solo que ya no se consideran las áreas que quedan por arriba del valor de 0 (Castro, 2021).

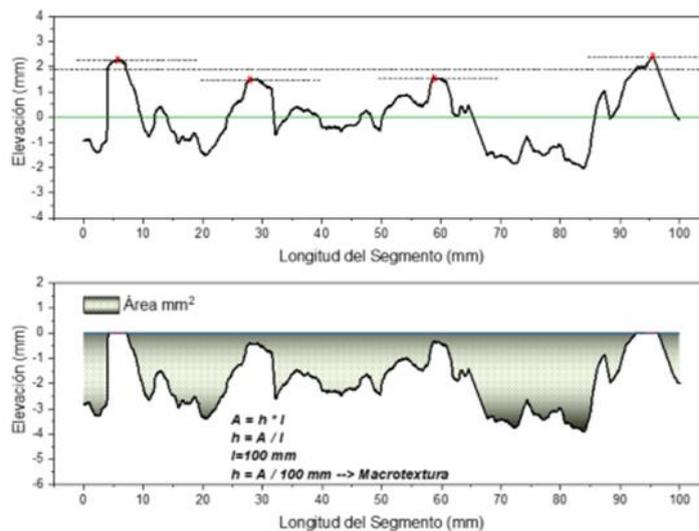


Figura 85. Propuesta de Algoritmo 3

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

d) Propuesta Algoritmo 4

En un cuarto algoritmo lo que se hizo fue dividir el segmento en 5 partes iguales y encontrar el punto máximo y mínimo en cada subsegmento de 20 mm, hacer una sumatoria de esas alturas y sacar un promedio y reportarlo directamente como valor de macrotextura (Castro,2021).

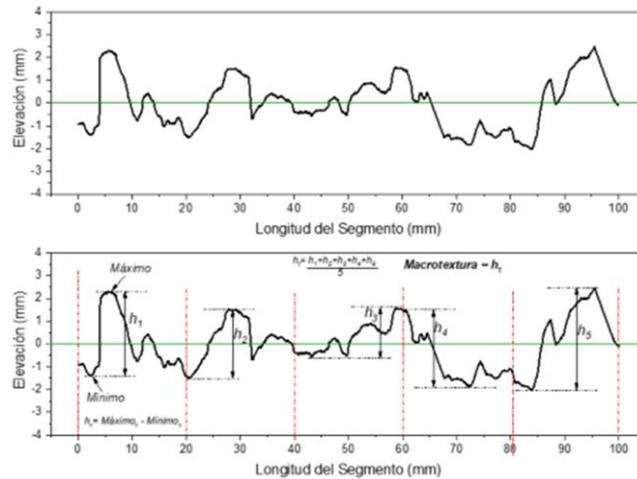


Figura 86. Propuesta de Algoritmo 4

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

e) Propuesta Algoritmo 5

Para un 5to algoritmo lo que se hizo fue dividir en dos segmentos, encontrar los valores máximos en cada subsegmento, desplazar de tal manera que ese valor se convierta en 0, calcular las dos áreas de cada subsegmento para sumarlas y dividir esa área entre 100mm, para obtener también el valor de macrotextura (Castro,2021).

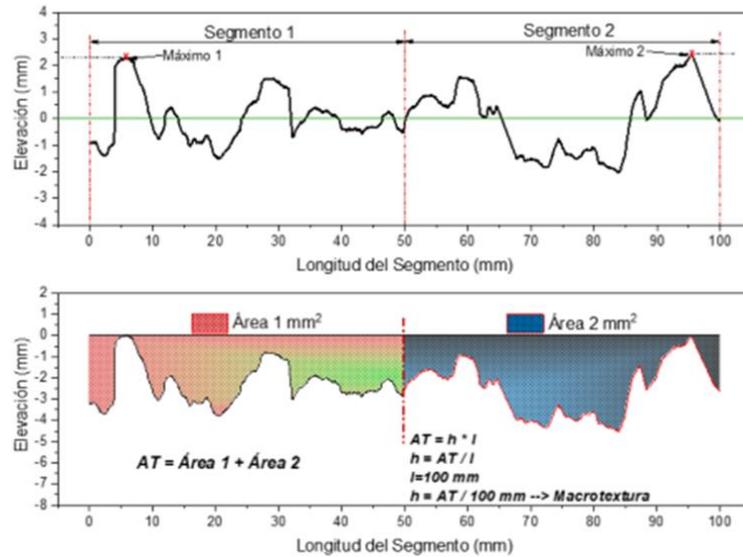


Figura 87. Propuesta de Algoritmo 5

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

Por lo tanto, para validar el texturómetro se hace un levantamiento de información se compara con la técnica volumétrica que es de referencia que se hace con personal experto en esta técnica, en cuanto al texturómetro para validarlo se hizo repeticiones sobre el mismo punto en diferentes tramos y hacer la comparativa.



Figura 88. Pruebas en campo con la técnica volumétrica

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).



Figura 89. Pruebas en campo realizadas con el texturómetro
 Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

Tener en cuenta que en cada punto donde se realizó las mediciones con el Texturómetro se hicieron 3 repeticiones los cuales son comparados con el ensayo del Círculo de arena y se halla el comportamiento de cada algoritmo implementado.

Como se puede observar el texturómetro muestra 5 algoritmos de los cuales se debe hallar cuál de estos guarda mayor relación con el ensayo del círculo de arena, para esto realizaron una regresión lineal con cada uno de los puntos evaluados en los tramos así como también con los puntos realizados con el texturómetro, realizándose para cada algoritmo que fue implementado.

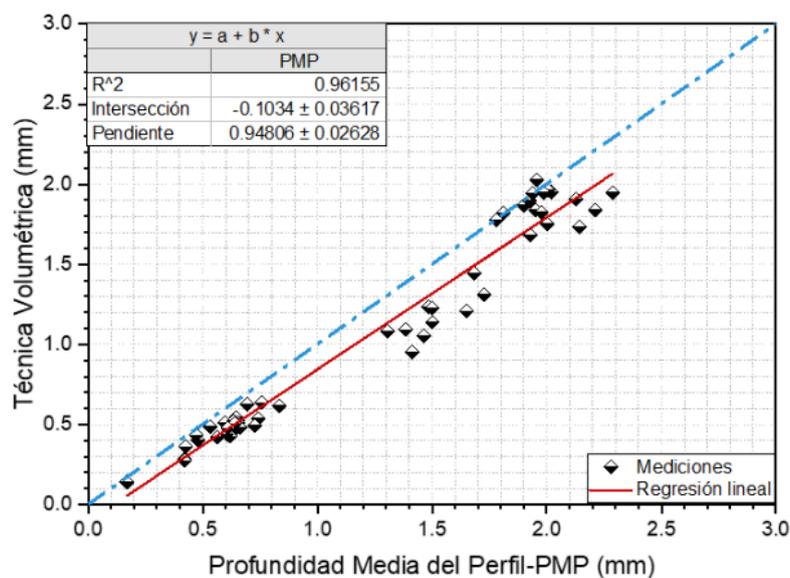


Figura 90. Relación PMP y Círculo de arena
 Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

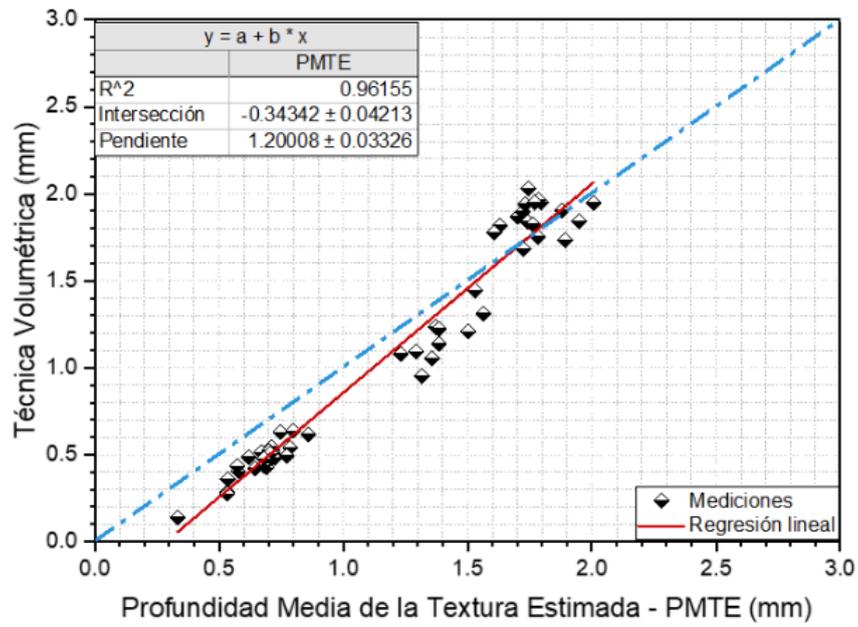


Figura 91. Relación PMTE y Círculo de arena

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

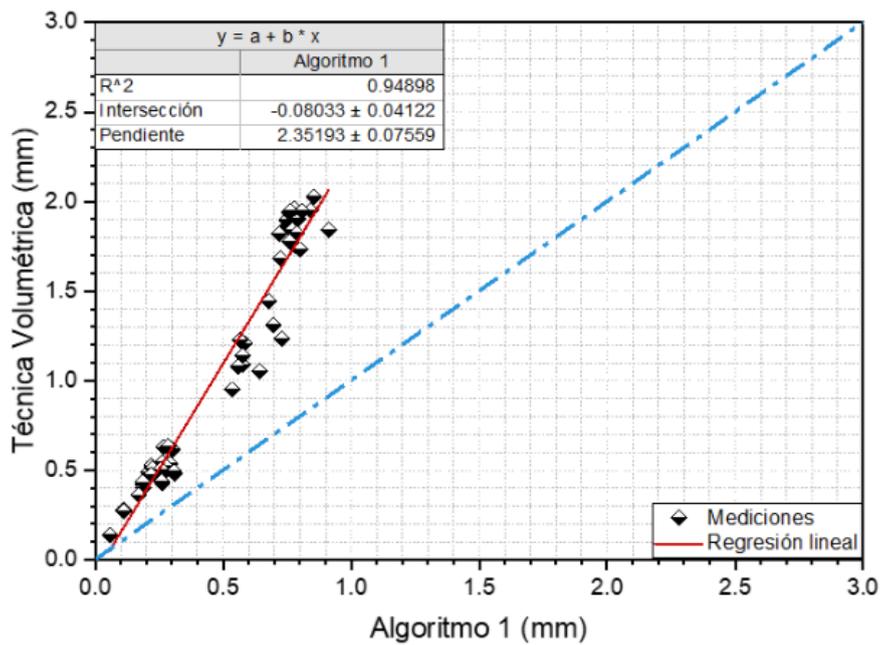


Figura 92. Relación del Algoritmo 1 y Círculo de arena

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

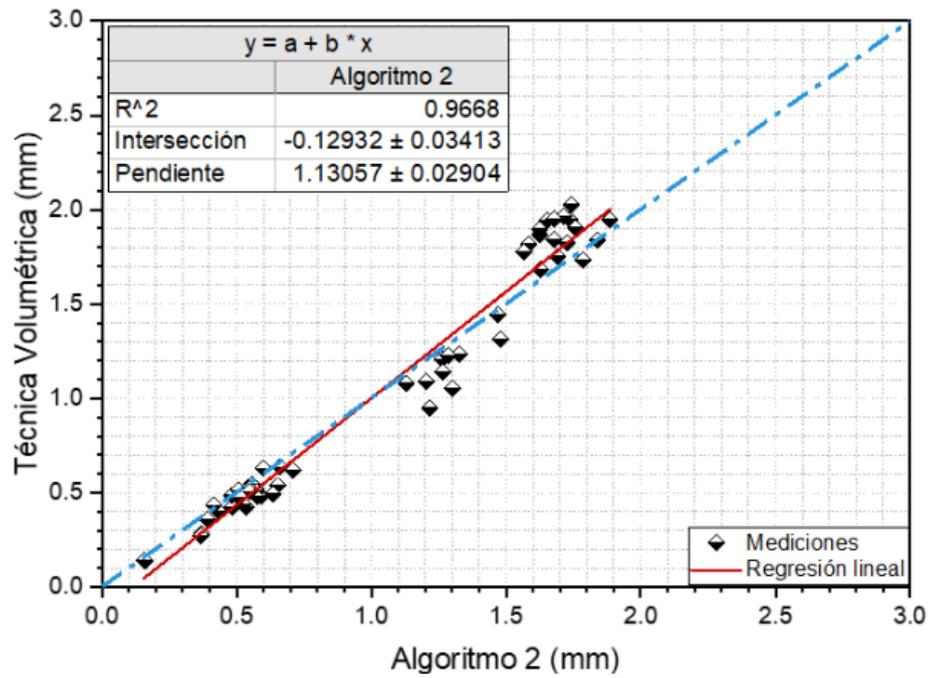


Figura 93. Relación del Algoritmo 2 y Círculo de arena

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

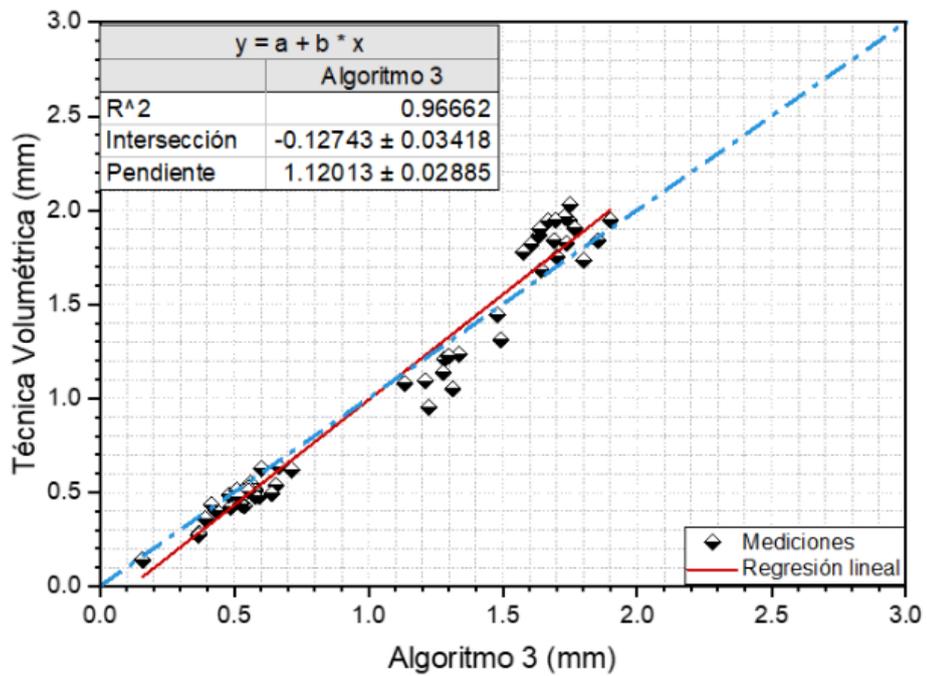


Figura 94. Relación del Algoritmo 3 y Círculo de arena

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

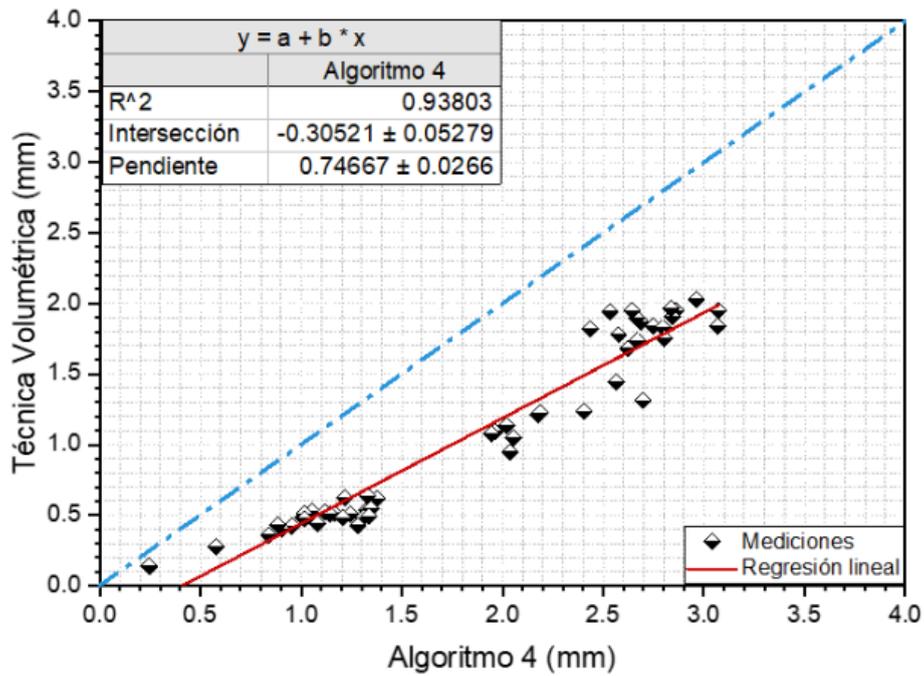


Figura 95. Relación del Algoritmo 4 y Círculo de arena

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

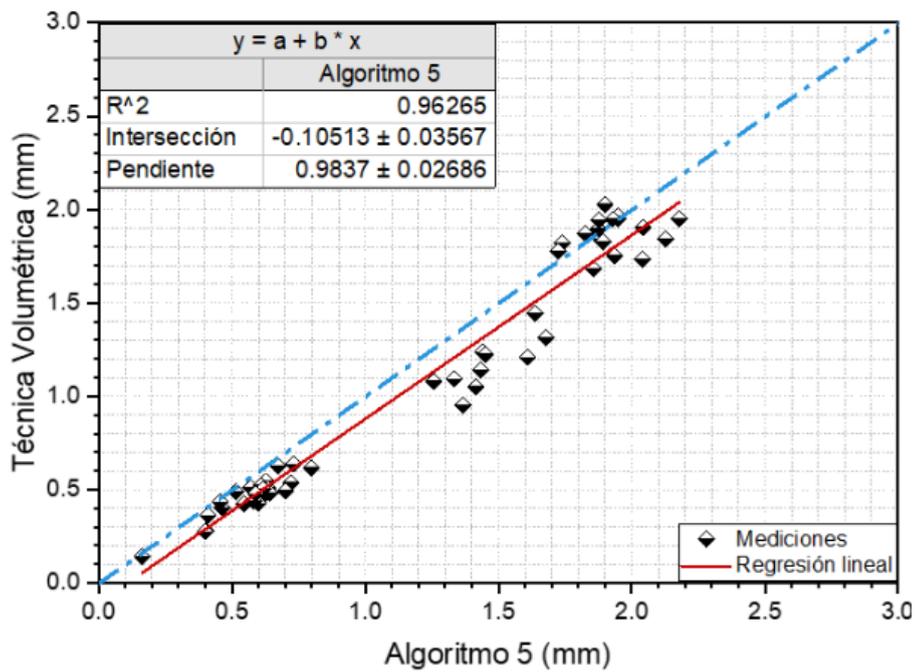


Figura 96. Relación del Algoritmo 5 y Círculo de arena

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

5.3.3 Interpretación de resultados (Círculo de arena vs. Perfilómetro inercial)

Como sabemos, el método volumétrico del círculo de arena nos proporcionará resultados de macrotextura de ciertos puntos de la carretera estudiada, pero al usar un perfilómetro inercial o láser, se pueden obtener estos datos de manera más rápida y de mayores distancias, ya que es un equipo con tecnología avanzada, que cuenta con láser, acelerómetro y de un computador.

El uso del perfilómetro es adecuado para el cálculo de la profundidad media de la macrotextura de datos del perfil. Los resultados de este cálculo, llamado MPD o Profundidad Media de Perfil) han demostrado ser útiles en la predicción de la velocidad de la fricción del pavimento mojado. El MPD se puede usar para estimar el resultado de una medición de la profundidad de la macrotextura usando una técnica volumétrica de acuerdo con el método de círculo de arena, el cual nos da valores MTD. Aunque ambos valores de MPD y MTD son diferentes debido al tamaño finito de las esferas de vidrio que se usan en la técnica volumétrica y, además porque el MPD se deriva de un perfil bidimensional obtenido por el perfilómetro, en lugar de una superficie tridimensional. Por lo tanto, se deberá usar una ecuación de transformación para poder comparar los resultados (Yacchirema, 2016).

En la tesis realizada por Humberto Yacchirema, se realizaron mediciones de macrotextura con círculo de arena y perfilómetro inercial en los tramos Colibrí-Pintag y Cuenca-Azogues en Ecuador, llegando a obtener 130 mediciones por ensayo.

En nuestro presente trabajo, se analizará y comparará solo los puntos tomados de ambos ensayos de una determinada distancia recorrida en el tramo Colibrí-Pintag, donde se realizaron 20 mediciones cada 0.50 m de las progresivas km 0+920 a 0+930 al igual que en las progresivas km 3+330 a 3+340.

Tabla 13.
Resultados macrotextura por círculo de arena en tramo Colibrí-Pintag (km 0+920 a 0+930)

KM 0+920 - 0+930	VOLUMEN	12500 mm ³			D promedio (mm)	MTD (mm)
	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4 (mm)		
P1	220	250	230	230	232.50	0.294
P2	250	250	230	250	245.00	0.265
P3	210	250	250	230	235.00	0.288
P4	260	240	250	280	257.50	0.240
P5	250	215	240	248	238.25	0.280
P6	255	234	245	245	244.75	0.266
P7	250	265	246	254	253.75	0.247
P8	260	245	265	255	256.25	0.242
P9	265	245	240	260	252.50	0.250
P10	260	243	240	255	249.50	0.256
P11	245	255	244	240	246.00	0.263
P12	240	248	253	250	247.75	0.259
P13	255	275	250	250	257.50	0.240
P14	237	250	278	245	252.50	0.250
P15	260	253	268	280	265.25	0.226
P16	275	253	255	270	263.25	0.230
P17	255	260	273	280	267.00	0.223
P18	255	263	277	265	265.00	0.227
P19	265	260	280	270	268.75	0.220
P20	290	298	300	294	295.50	0.182
					PROMEDIO	0.25

Fuente: Yacchirema, (2016).

Tabla 14.

Resultados macrotextura por círculo de arena en tramo Colibrí-Pintag (km 3+330 a 3+340)

KM 3+330 - 3+340	VOLUMEN	25000 mm ³				D promedio (mm)	MTD (mm)
	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)			
P1	185	170	173	198	181.50	0.966	
P2	186	190	180	190	186.50	0.915	
P3	183	194	175	170	180.50	0.977	
P4	195	196	183	180	188.50	0.896	
P5	214	185	185	212	199.00	0.804	
P6	173	170	174	180	174.25	1.048	
P7	168	185	180	190	180.75	0.974	
P8	185	171	176	184	179.00	0.993	
P9	175	183	186	194	184.50	0.935	
P10	193	183	185	195	189.00	0.891	
P11	200	181	193	198	193.00	0.855	
P12	172	183	185	175	178.75	0.996	
P13	165	174	170	188	174.25	1.048	
P14	170	193	195	173	182.75	0.953	
P15	193	190	204	190	194.25	0.844	
P16	210	216	190	191	201.75	0.782	
P17	181	198	185	173	184.25	0.938	
P18	186	210	210	185	197.75	0.814	
P19	177	200	205	190	193.00	0.855	
P20	200	177	190	203	192.50	0.859	
					PROMEDIO	0.92	

Fuente: Yacchirema, (2016).

Las mediciones hechas con el perfilómetro se realizaron en las mismas zonas donde se hizo el ensayo de círculo de arena para así comparar resultados y obtener una correlación que permita que los valores del MPD obtenidos con este equipo se ajusten a los valores de la macrotextura medidas anteriormente con el método volumétrico (Yacchirema, 2016).



Figura 97. Perfilómetro láser midiendo en mismo sitio que el ensayo volumétrico.

Fuente: Yacchirema, H. (2016).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el perfilómetro en el tramo de Colibrí-Pintag, de las progresivas km 0+920 a 0+930.

Tabla 15.
Resultados del perfilómetro en tramo Colibrí-Pintag (0+920 a 0+930)

KM 0+920 - 0+930	MPD (Micrones)	RMPD (mm)
P1	74	0.074
P2	74	0.074
P3	56	0.056
P4	60.5	0.0605
P5	65	0.065
P6	50	0.05
P7	50	0.05
P8	40	0.04
P9	34	0.034
P10	38	0.038
P11	42	0.042
P12	40.5	0.0405
P13	39	0.039
P14	32.5	0.0325
P15	26	0.026
P16	31	0.031
P17	36	0.036
P18	38.5	0.0385
P19	41	0.041
P20	41	0.041

Fuente: Yacchirema, (2016).

De la misma manera se presenta los resultados del perfilómetro entre las progresivas km 3+330 a 3+340, del mismo tramo.

Tabla 16.
Resultados del perfilómetro en tramo Colibrí-Pintag (3+330 a 3+340)

KM 3+330 - 3+340	MPD (Micrones)	RMPD (mm)
P1	532	0.532
P2	532	0.532
P3	600	0.6
P4	530	0.53
P5	520	0.52
P6	600	0.6
P7	540	0.54
P8	550	0.55
P9	510	0.51
P10	477.5	0.4775
P11	445	0.445
P12	580	0.58
P13	620	0.62
P14	588.5	0.5885
P15	530	0.53
P16	510	0.51
P17	578	0.578
P18	528	0.528
P19	478	0.478
P20	478	0.478

Fuente: Yacchirema, (2016).

Luego de haber obtenido 130 puntos de cada ensayo, para poder determinar la ecuación de ajuste debemos tener los valores con las mismas unidades de medida (mm). Para cada abscisa de medición se obtuvieron dos valores, uno con el ensayo de círculo de arena y el otro con el perfilómetro, el objetivo es relacionar estos valores en un gráfico de puntos de dispersión, para luego y mediante una regresión obtener una correlación, con una ecuación de ajuste. Para realizar el gráfico, ubicaremos en el eje de las ordenadas (y) los valores de MTD (Círculo de Arena), y en el eje de las abscisas (x), los valores de MPD (Profundidad Media del Perfil), obtenidos con el equipo (Yacchirema, 2016).

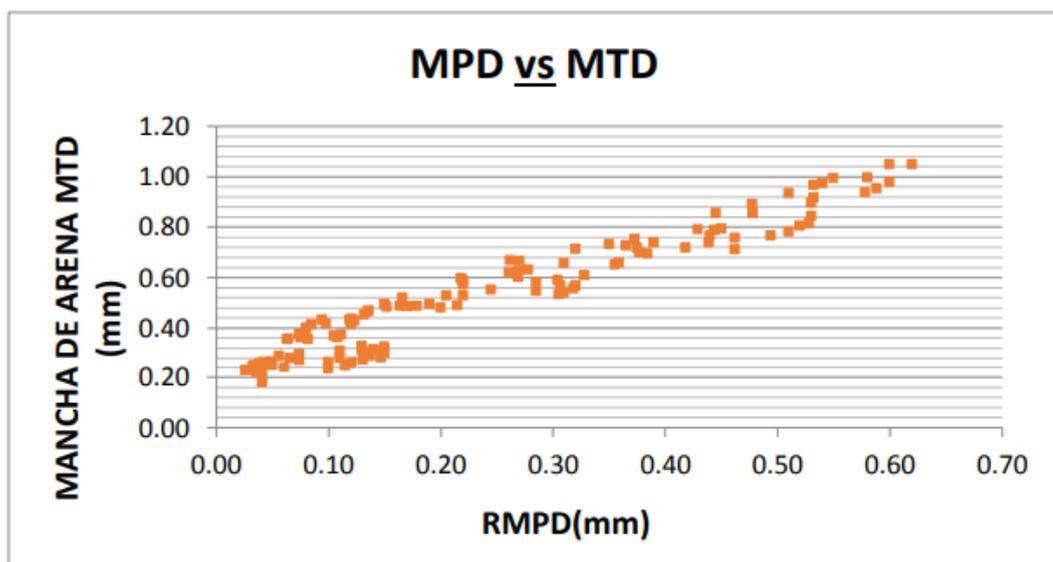


Figura 98. Relación MPD vs MTD

Fuente: Yacchirema, H. (2016).

Con la ayuda del software Excel, se realizó diferentes ecuaciones de ajuste para determinar cuál es la que cumple con una correlación, resultando ser la ecuación polinómica la de mejor ajuste.

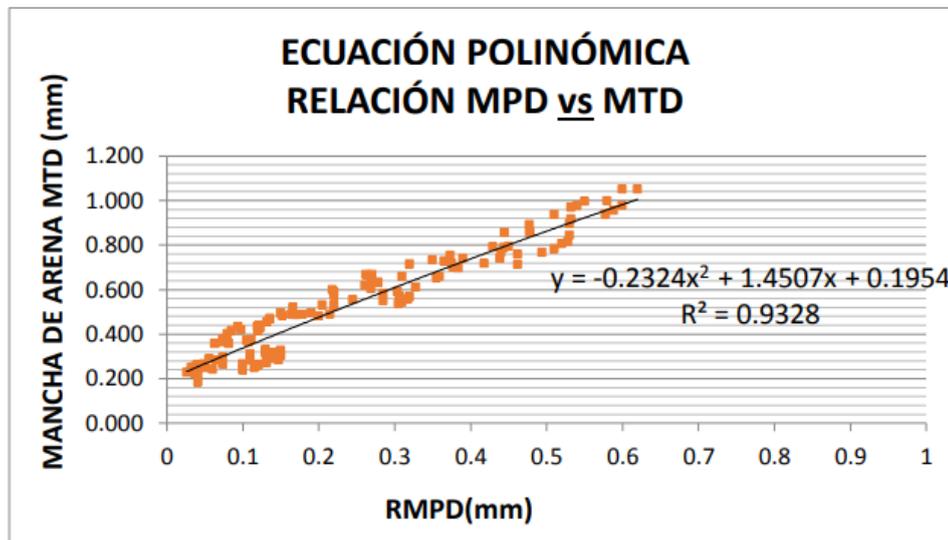


Figura 99. Ecuación polinómica de la relación MPD vs MTD

Fuente: Yacchirema, H. (2016).

Tabla 17.
Tipos de ecuaciones para ajuste de correlación.

Tipo de Ecuación	Ecuación	Coef. Determinación
Lineal	$y = 1.3141(x) + 0.2079$	0.9322
Exponencial	$y = 0.2589 e^{2.4979(x)}$	0.8598
Logarítmica	$y = 0.2528 \ln(x) + 0.9631$	0.8357
Polinómica	$y = -0.2324(x)^2 + 1.4507(x) + 0.1954$	0.9328

Fuente: Yacchirema, (2016).

Se determina que la ecuación con un coeficiente de determinación más próximo a la unidad es la ecuación polinómica, es decir, nos puede proporcionar resultados más confiables.

$$y = -0.2324 (x)^2 + 1.4507(x) + 0.1954 \quad (5)$$

Donde reemplazaremos los valores obtenidos con el perfilómetro obtenidos como MPD, para así calcular resultados de macrotextura MTD.

$$MTD = -0.2324(MPD)^2 + 1.4507(MPD) + 0.1954 \quad (6)$$

Los resultados obtenidos con la propuesta del autor Yacchirema, serán contrastados con los resultados calculados mediante la ecuación de la fig. 63, según la norma N·CSV·CAR·1·03·006/16, es decir, a partir de los perfiles conseguidos con el perfilómetro, y hallada la Profundidad Media del Perfil (PMP o MPD) para cada punto estudiado, se convertirán en Profundidad Media de la Textura Estimada (PMTE).

A continuación, se realizará el cálculo mencionado, para los km 0+920 – 0+930 y km 3+330 – 3+340 del tramo Colibrí-Pintag.

Tabla 18.
PMTE del km 0+920 – 0+930 del tramo Colibrí-Pintag

Km 0+920 - 0+930	MPD (mm) con Perfilómetro Inercial	PMTE (mm) con ecuación	MTD (mm) con Círculo de Arena
P1	0.074	0.258	0.294
P2	0.074	0.258	0.265
P3	0.056	0.244	0.288
P4	0.061	0.248	0.240
P5	0.065	0.251	0.280
P6	0.050	0.240	0.266
P7	0.050	0.240	0.247
P8	0.040	0.232	0.242
P9	0.034	0.227	0.250
P10	0.038	0.230	0.256
P11	0.042	0.233	0.263
P12	0.041	0.232	0.259
P13	0.039	0.231	0.240
P14	0.033	0.226	0.250
P15	0.026	0.221	0.226
P16	0.031	0.224	0.230
P17	0.036	0.228	0.223
P18	0.039	0.230	0.227
P19	0.041	0.232	0.220
P20	0.041	0.232	0.182

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19.
 PMTE del km 3+330 – 3+340 del tramo Colibrí-Pintag

Km 3+330 - 3+340	MPD (mm) con Perfilómetro Inercial	PMTE (mm) con ecuación	MTD (mm) con Círculo de Arena
P1	0.074	0.620	0.294
P2	0.074	0.620	0.265
P3	0.056	0.674	0.288
P4	0.061	0.619	0.240
P5	0.065	0.611	0.280
P6	0.050	0.674	0.266
P7	0.050	0.627	0.247
P8	0.040	0.635	0.242
P9	0.034	0.603	0.250
P10	0.038	0.577	0.256
P11	0.042	0.552	0.263
P12	0.041	0.658	0.259
P13	0.039	0.690	0.240
P14	0.033	0.665	0.250
P15	0.026	0.619	0.226
P16	0.031	0.603	0.230
P17	0.036	0.657	0.223
P18	0.039	0.617	0.227
P19	0.041	0.578	0.220
P20	0.041	0.578	0.182

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Análisis de resultados

En este capítulo se muestran los resultados de manera ordenada y relacionada; de los valores obtenidos de Macrotextura y Microtextura (Fricción) y su comparativa con los equipos de Bajo Rendimiento y Alto Rendimiento.

5.4.1 Péndulo Británico vs SCRIM

Se hace el análisis de los resultados de medición con el Equipo SCRIM y Péndulo Británico (TRRL), empezando con los resultados del SCRIM.

Se realizó la evaluación del coeficiente de fricción según en el tramo de prueba II, se toma la información cada 200m tanto para la pista 1 y pista 2.

PISTA N°1

Km	Km	Long. Tramo [km]	Coefficiente Fricción [SFC]	Tipo de mezcla asfáltica
19.000	19.200	0.200	0.77	Mezcla tradicional
19.200	19.300	0.100	0.65 (*)	
19.300	19.400	0.100	0.67 (*)	Mezcla con polvo de caucho
19.400	19.600	0.200	0.72	
19.600	19.800	0.200	0.76	
20.800	21.000	0.200	0.70	Mezcla tradicional

PISTA N°2

Km	Km	Long. Tramo [km]	Coefficiente Fricción [SFC]	Tipo de mezcla asfáltica
21.000	20.800	0.200	0.75	Mezcla tradicional
19.800	19.600	0.200	0.81	Mezcla con polvo de caucho
19.600	19.400	0.200	0.83	
19.400	19.300	0.100	0.81	
19.300	19.200	0.100	0.72	Mezcla tradicional
19.200	19.000	0.200	0.74	

Figura 100. Control de coeficiente de fricción para pista 1 y 2

Fuente: Navarro, N. (2013).

En cuantos a las mediciones obtenidas los valores del coeficiente de fricción en el Tramo de Prueba, para las pitas 1 y 2 de dicho tramo, cumplen el mínimo exigido de 0.4SFC en todo el tramo de la superficie evaluada, así mismo ocurre con el tramo con mezcla asfáltica tradicional.

Para la comparación de resultados, los valores hallados en el Tramo de Prueba son mayores que los del pavimento tradicional, ya que sus valores promedios son de 0.74SFC en la pista N° 1 y de 0.82SFC en la pista N° 2, y en cuanto al tramo con mezcla tradicional, su valor promedio es de 0.74SFC para la pista 1 y 2.

De este modo, el pavimento hecho con la mezcla con incorporación de polvo de caucho parece brindar una superficie con mejores propiedades frente a la resistencia al deslizamiento en comparación a uno hecho con mezcla asfáltica tradicional, ya que es muy importante para la seguridad de los usuarios cuando estos tengan que realizar frenados con sus vehículos, así como también en curvas con pavimento húmedo.

Condición	Autopistas, Corredores Carreteros, Red Básica Libre y Red Secundaria
No aceptable (pulido)	0 a 0,40
Aceptable	0,41 a 0,60
Bueno	0,61 a 0,90
No aceptable (áspero)	> 0,90

Figura 101. Valores referenciales de fricción.

Fuente: Garnica, P. (2021).

En cuanto a los resultados con el Péndulo Británico los resultados CRD obtenidos son los siguientes:

PISTA N°1

Km	Huella	CRD (BPN/100)	Tipo de mezcla asfáltica
19.460	Externa	0.71	Mezcla con polvo de caucho
19.560	Externa	0.66	
19.660	Externa	0.55	
19.760	Externa	0.67	
20.950	Externa	0.56	Mezcla tradicional

PISTA N°2

Km	Huella	CRD (BPN/100)	Tipo de mezcla asfáltica
20.950	Externa	0.67	Mezcla tradicional
19.760	Externa	0.60	Mezcla con polvo de caucho
19.660	Externa	0.55	
19.560	Externa	0.64	
19.460	Externa	0.59	

Figura 102. Control de CRD para pista 1 y 2

Fuente: Navarro, N. (2013).

La toma de datos de la resistencia al deslizamiento en la superficie del Tramo de Prueba se realizó cada 100m. La normativa exige un valor BPN mínimo de 55, equivalente a un valor CRD de 0.55.

En las pistas 1 y 2 sus valores hallados del Tramo de Prueba superan el mínimo exigido, así como también el pavimento con la mezcla asfáltica patrón, donde también se confirma la exigencia en ambas pistas.

Por lo tanto, en cuanto a los resultados hallados con el SCRIM hay diferencias, ya que con el péndulo británico TRRL hay mejores resultados para el coeficiente de fricción en la pista N° 1 del Tramo de Prueba en comparación a la pista N° 2 (CRD promedio de 0.65 versus 0.60, respectivamente). Casi parecido es al comparar los resultados del Tramo de Prueba con los del tramo con mezcla asfáltica tradicional en la pista N° 2.

En cuanto a este suceso, es importante resaltar que las mediciones con el péndulo son discretas, lo que dificulta totalmente caracterizar completamente el pavimento en toda su extensión como lo hace el SCRIM, e incluso solo se realizaron dos mediciones en el sector con mezcla asfáltica tradicional, uno por pista, los valores obtenidos no son concluyentes.

5.4.2 Circulo de Arena vs Texturómetro

Tabla 20.
Resultados del Círculo de arena y Texturómetro

	Cadenamiento	Profundidad Media del Perfil - PMP	Profundidad Media de la Textura Estimada - PMTE	Algoritmo 1	Algoritmo 2	Algoritmo 3	Algoritmo 4	Algoritmo 5	Técnica Volumétrica
	(km)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Tramo I	0+000	0.564	0.645	0.187	0.484	0.486	0.954	0.547	0.423
	0+020	0.741	0.786	0.294	0.652	0.655	1.324	0.722	0.537
	0+040	0.652	0.715	0.221	0.540	0.544	1.055	0.620	0.526
	0+060	0.693	0.748	0.268	0.599	0.603	1.217	0.673	0.628
	0+080	0.834	0.859	0.303	0.708	0.714	1.378	0.799	0.617
	0+100	0.758	0.799	0.285	0.661	0.664	1.328	0.733	0.638
	0+120	0.479	0.578	0.186	0.432	0.433	0.905	0.462	0.403
	0+140	0.425	0.536	0.171	0.392	0.392	0.840	0.411	0.361
	0+160	0.645	0.709	0.312	0.591	0.593	1.309	0.625	0.482
	0+180	0.532	0.620	0.209	0.481	0.482	1.010	0.516	0.488
	0+200	0.644	0.709	0.252	0.574	0.576	1.166	0.619	0.516
Tramo 15A	0+000	0.645	0.710	0.264	0.557	0.560	1.347	0.627	0.545
	0+020	0.652	0.715	0.273	0.576	0.579	1.245	0.634	0.509
	0+040	0.596	0.671	0.224	0.507	0.510	1.014	0.571	0.513
	0+060	0.633	0.700	0.277	0.547	0.551	1.117	0.611	0.522
	0+080	0.663	0.724	0.262	0.575	0.580	1.209	0.642	0.481
	0+100	0.620	0.690	0.263	0.535	0.539	1.283	0.600	0.428
	0+120	0.470	0.572	0.185	0.414	0.416	0.883	0.455	0.435
	0+140	0.640	0.705	0.257	0.548	0.553	1.144	0.618	0.506
	0+160	0.604	0.677	0.258	0.524	0.526	1.082	0.581	0.439
	0+180	0.608	0.680	0.219	0.512	0.516	1.017	0.587	0.478
	0+200	0.725	0.773	0.309	0.635	0.641	1.339	0.700	0.494
Tramo 5A	0+010	1.649	1.503	0.582	1.264	1.284	2.176	1.608	1.209
	0+030	1.414	1.317	0.534	1.215	1.225	2.037	1.367	0.951
	0+050	1.384	1.294	0.577	1.204	1.212	1.960	1.335	1.092
	0+070	1.306	1.231	0.559	1.128	1.137	1.945	1.256	1.079
	0+090	1.464	1.357	0.643	1.302	1.313	2.054	1.415	1.052
	0+110	1.484	1.372	0.730	1.328	1.337	2.405	1.441	1.236
	0+130	1.725	1.563	0.695	1.479	1.492	2.698	1.678	1.312
	0+150	1.683	1.529	0.677	1.469	1.478	2.563	1.638	1.443
	0+170	1.499	1.385	0.566	1.285	1.299	2.187	1.450	1.224
	0+190	1.500	1.385	0.576	1.265	1.277	2.018	1.433	1.138
	Tramo 8C	0+040	2.020	1.796	0.842	1.737	1.748	2.861	1.950
0+050		2.127	1.880	0.792	1.756	1.769	2.843	2.045	1.904
0+060		1.901	1.702	0.752	1.624	1.635	2.685	1.826	1.868
0+070		1.930	1.724	0.724	1.627	1.640	2.621	1.857	1.683
0+080		1.952	1.742	0.770	1.678	1.692	2.747	1.885	1.840
0+090		1.977	1.761	0.789	1.727	1.737	2.794	1.893	1.826
0+100		1.955	1.744	0.856	1.741	1.750	2.960	1.901	2.027
0+110		2.213	1.948	0.913	1.838	1.855	3.065	2.127	1.840
0+120		2.002	1.782	0.781	1.689	1.703	2.804	1.938	1.752
0+130		1.811	1.630	0.718	1.584	1.603	2.436	1.741	1.819
0+140		1.781	1.607	0.759	1.566	1.575	2.576	1.725	1.778
0+150		2.006	1.785	0.778	1.714	1.730	2.839	1.950	1.964
0+160		1.927	1.722	0.749	1.623	1.637	2.666	1.876	1.897
0+170		1.938	1.731	0.757	1.654	1.669	2.533	1.877	1.941
0+180		2.142	1.892	0.799	1.786	1.801	2.670	2.041	1.733
0+190	1.988	1.770	0.761	1.678	1.696	2.642	1.930	1.949	
0+200	2.288	2.007	0.809	1.886	1.900	3.074	2.179	1.949	
Tablas	0+000	0.421	0.533	0.112	0.369	0.370	0.578	0.401	0.281
	0+010	0.420	0.531	0.112	0.367	0.368	0.579	0.400	0.275
	0+020	0.169	0.334	0.058	0.159	0.159	0.247	0.163	0.140
	0+030	0.168	0.333	0.058	0.157	0.158	0.246	0.163	0.140

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

Como se puede observar se analizan 5 algoritmos de los cuales se debe elegir cuál de todos presentó un mejor factor de correlación, por lo tanto de los algoritmos propuestos el que menor correlación presentó fue el Algoritmo 1, con una pendiente de 2.35193, una intersección de -0.8033 y un coeficiente de

determinación de 0.94898, y el que presento un mejor factor de correlación es el Algoritmo 5 con una pendiente de 0.9837, una intersección de -0.10513 y un coeficiente de determinación de 0.96265.

Por lo tanto se propuso que el Algoritmo 5 sea el elegido para la estimación de la macrotextura con el Texturómetro (ver figura N°96 y N°100).

De la tabla 20 se obtuvo un valor de macrotextura promedio de 0.511 mm para el Tramo 1, un valor medio de 0.486 mm para el Tramo 15A, un valor medio de macrotextura de 1.174 mm para el Tramo 5A, un valor medio de 1.866 mm para el caso del Tramo 8C, un valor de 0.278 para una de las tablas con bajo nivel de textura y finalmente se obtuvo un valor medio de 0.148 mm para la tabla restante.

En cuanto a errores en la técnica volumétrica podemos mencionar dos fuentes de error: Por operador y por tamaño de la microesfera, siendo la principal la del operador que realiza la prueba, y para comprobar que existen errores en la toma de mediciones se realizaron mediciones sobre un mismo punto de referencia con 3 operarios, de los cuales cada uno hizo 2 repeticiones. Estos resultados se muestran a continuación en la tabla 21.

Tabla 21.
Error por operador en el ensayo del Círculo de Arena

					Volumen Utilizado (cm ³)	12.46
Operador	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro 3	Diámetro 4	Diámetro Promedio	Macrotextura
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(mm)
Operador 1	23.500	24.500	23.700	23.400	23.775	0.281
	23.000	24.000	24.100	23.900	23.750	0.281
Operador 2	18.500	18.500	18.300	20.000	18.825	0.448
	19.500	19.000	18.000	20.000	19.125	0.434
Operador 3	20.500	20.600	20.900	20.400	20.600	0.374
	21.100	21.000	20.500	21.300	20.975	0.361
Promedio						0.363
Desviación Estándar						0.072
Coefficiente de Variación						19.77%

Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

Los resultados se muestran en la Tabla 21, de la cual se obtuvo un promedio de 0.363 para los datos con los tres operadores, se obtuvo una desviación estándar de 0.072 y un coeficiente de variación de 19.77 %, es decir que por efecto del operador podría introducirse un error de casi el 20 % en las mediciones.

Otro error en la medición se da cuando no se cumplen las características en cuanto al tamaño de la microesfera que se usa para hacer el ensayo del Círculo de Arena. Para eso la normativa indica que el tamaño de la microesfera deberá estar entre 180um y 250um. Para corroborar el error se utilizaron dos tipos de microesfera una con las características especificadas por la normativa y otra con una microesfera de mayor tamaño. Los resultados lo podemos observar en las siguientes tablas 22.

Tabla 22.

Tramo 1, para los dos distintos tamaños de microesfera.

	Microesfera Gruesa	Microesferea Normativa	Diferencia	Diferencia (%)
	Macrotectura (mm)	Macrotectura (mm)		
Punto 1	0.616	0.865	0.250	28.9%
Punto 2	0.591	0.774	0.183	23.7%
Punto 3	0.477	0.627	0.150	24.0%
Punto 4	0.627	0.852	0.225	26.5%
Punto 5	0.517	0.741	0.224	30.2%
Punto 6	0.719	0.903	0.184	20.3%
Punto 7	0.519	0.682	0.163	23.9%
Punto 8	0.632	0.780	0.148	18.9%
Punto 9	0.468	0.550	0.083	15.0%
Punto 10	0.788	0.966	0.177	18.4%
			Promedio	23.0%

Fuente: Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

Tabla 23.

Tramo 2, para los dos distintos tamaños de microesfera

	Microesfera Gruesa	Microesfera Normativa		
	Macrotectura (mm)	Macrotectura (mm)	Diferencia	Diferencia (%)
Punto 1	0.719	0.786	0.067	8.5%
Punto 2	0.707	0.852	0.145	17.0%
Punto 3	0.660	0.820	0.160	19.5%
Punto 4	0.663	0.841	0.178	21.2%
Punto 5	0.635	0.774	0.139	18.0%
Punto 6	0.696	0.863	0.167	19.4%
Punto 7	0.699	0.865	0.166	19.2%
Punto 8	0.692	0.856	0.164	19.2%
Punto 9	0.549	0.664	0.115	17.3%
Punto 10	0.686	0.796	0.110	13.8%
			Promedio	17.3%

Texturómetro basado en visión artificial, Castro, F. (2021).

En la Tabla 22 y 23 se muestran los resultados del estudio realizado, en donde se obtiene una diferencia promedio de 23.0 % para el Tramo 1 y una diferencia de 17.3 % para el Tramo 2, a lo que podemos decir que el error introducido puede ser de hasta un 20 % o superior si no se usa la granulometría adecuada.

De los coeficientes de variación promedio obtenidos con el texturómetro se obtienen variaciones entre repeticiones son inferiores al 3.0 %, muy por debajo a la técnica volumétrica, en la que de acuerdo con el análisis realizado para, la variación por operador y tamaño de granulometría, pueden obtenerse diferencias de hasta 40.0 % (Castro, 2021).

Por lo tanto, si se suma el error dado por el operador y el del tamaño de la microesfera usada en el ensayo resulta un error aproximado del 40%, lo que esto nos lleva a un error considerablemente grande en la toma de mediciones. Y en cuanto a los costos anuales de operación al texturómetro son menores a los costos de operación del círculo de arena, ya que sea tendrá un ahorro del 50%, gracias a esto hace que el equipo del texturómetro sea rentable, habiendo una disminución considerable en los costos de operación, así como la recolección de datos es más rápido, y la información de los datos son más precisos que la del círculo de arena (Castro, 2021).

5.4.3 Círculo de Arena vs Perfilómetro Inercial

Con los datos obtenidos de ambos ensayos y presentados en el 5.3.3, utilizaremos la ecuación 6 para convertir los valores MPD a MTD y poder compararlos en un gráfico de dispersión en Excel.

Tabla 24.

Resumen de resultados del Km 0+920 – 0+930

Km 0+920 - 0+930	MPD (mm) con Perfilómetro Inercial	MTD (mm) con ecuación de ajuste	MTD (mm) con Círculo de Arena
P1	0.074	0.301	0.294
P2	0.074	0.301	0.265
P3	0.056	0.276	0.288
P4	0.061	0.282	0.240
P5	0.065	0.289	0.280
P6	0.050	0.267	0.266
P7	0.050	0.267	0.247
P8	0.040	0.253	0.242
P9	0.034	0.244	0.250
P10	0.038	0.250	0.256
P11	0.042	0.256	0.263
P12	0.041	0.254	0.259
P13	0.039	0.252	0.240
P14	0.033	0.242	0.250
P15	0.026	0.233	0.226
P16	0.031	0.240	0.230
P17	0.036	0.247	0.223
P18	0.039	0.251	0.227
P19	0.041	0.254	0.220
P20	0.041	0.254	0.182

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de la Tabla 24 se realiza el siguiente gráfico.

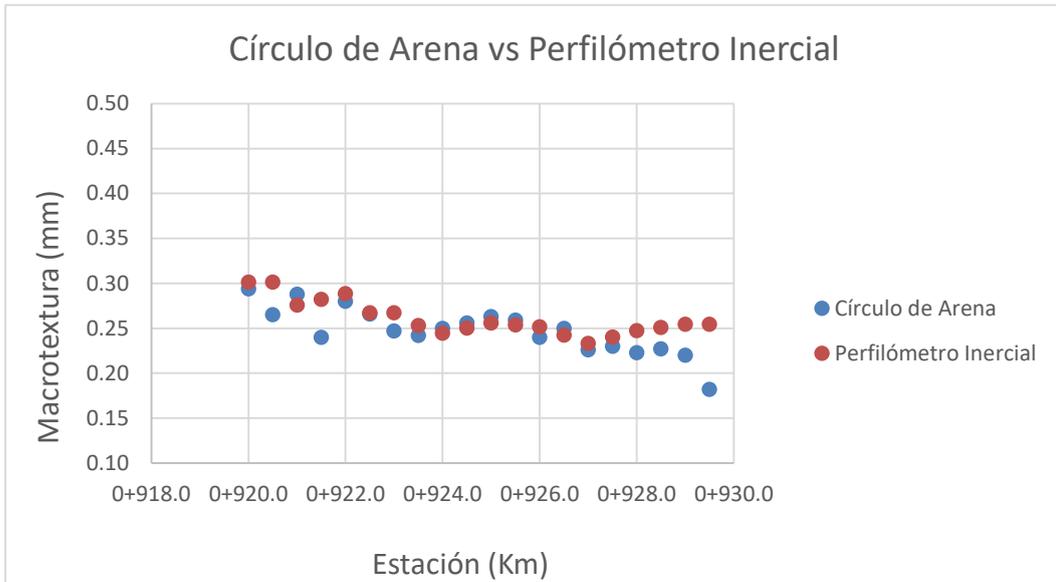


Figura 103. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial N° 1

Fuente: Elaboración propia.

Se realiza el mismo procedimiento para el siguiente tramo:

Tabla 25.

Resumen de resultados del Km 3+330 – 3+340

Km 3+330 - 3+340	MPD (mm) con Perfilómetro Inercial	MTD (mm) con ecuación de ajuste	MTD (mm) con Círculo de Arena
P1	0.532	0.901	0.966
P2	0.532	0.901	0.915
P3	0.600	0.982	0.977
P4	0.530	0.899	0.896
P5	0.520	0.887	0.804
P6	0.600	0.982	1.048
P7	0.540	0.911	0.974
P8	0.550	0.923	0.993
P9	0.510	0.875	0.935
P10	0.478	0.835	0.891
P11	0.445	0.795	0.855
P12	0.580	0.959	0.996
P13	0.620	1.005	1.048
P14	0.589	0.969	0.953
P15	0.530	0.899	0.844
P16	0.510	0.875	0.782
P17	0.578	0.956	0.938
P18	0.528	0.897	0.814
P19	0.478	0.836	0.855
P20	0.478	0.836	0.859

Fuente: Elaboración propia.

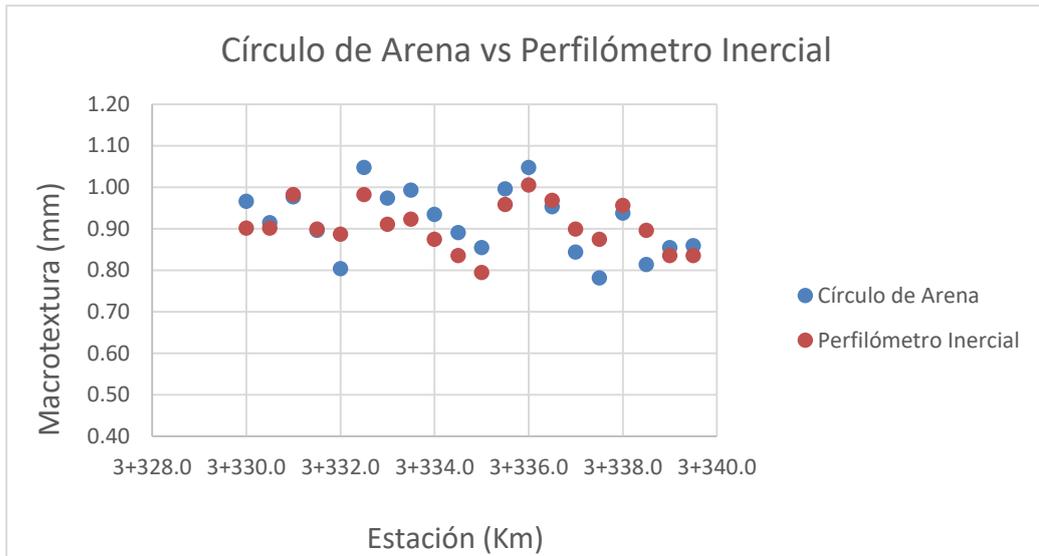


Figura 104. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial N° 2

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, también se realizará la comparación con los resultados obtenidos con la ecuación de la figura 63 de la PMTE y con los del círculo de arena, mostrado en un gráfico de dispersión:

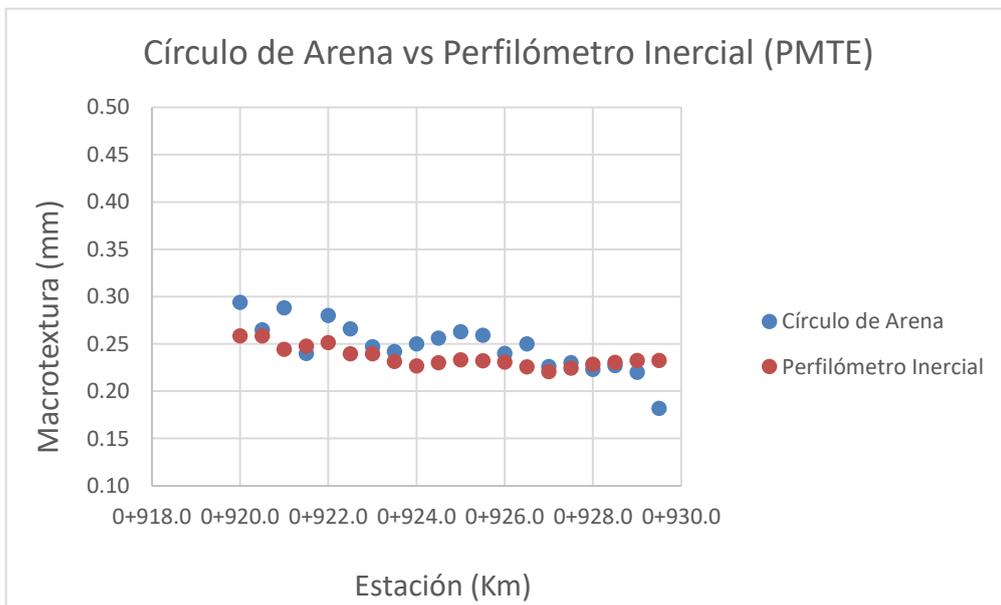


Figura 105. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial (PMTE) N° 1

Fuente: Elaboración propia.

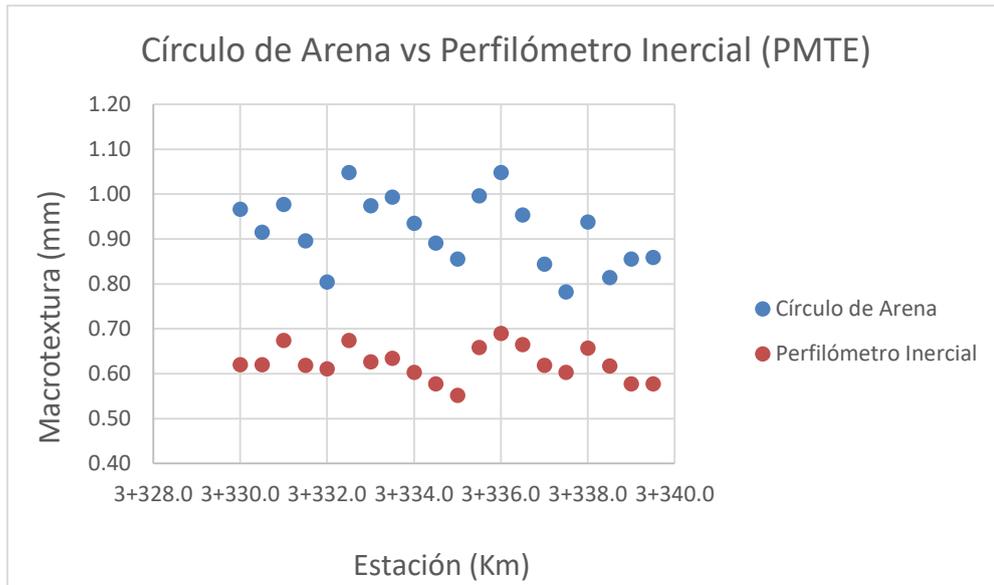


Figura 106. Círculo de arena vs Perfilómetro Inercial (PMTE) N° 2

Fuente: Elaboración propia.

Como se ven en los gráficos, al usar la ecuación de la fig. 63 del PMTE, la cual es aceptada por norma, se nota que los puntos obtenidos con el perfilómetro salen más continuos, comparados con los puntos obtenidos con la ecuación de ajuste.

Por lo tanto, se comprueba que con esta ecuación, el gráfico de dispersión mostrará una mejor muestra de puntos, y no con tantos desfases como el del ensayo de círculo de arena, donde se pueden cometer errores humanos.

5.5 Contratación de Hipótesis

5.5.1 Hipótesis Específica a).

Hipótesis alterna H-a):

Con la microtextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (Péndulo Británico o TRRL) y alto rendimiento (SCRIM), incide en el riesgo de accidentes.

Hipótesis nula H-0:

Con la microtextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (Péndulo Británico o TRRL) y alto rendimiento (SCRIM), no incide en el riesgo de accidentes.

Se analizaron las mediciones que se hicieron con el equipo del TRRL o Péndulo británico correspondiente a los equipos de bajo rendimiento y por el lado de los equipos de alto rendimiento se analizó al SCRIM.

Con los cuales se hallaron el valor de la microtextura, y como se mencionó antes para la tener una buena microtextura hay una necesidad de hallar la resistencia al deslizamiento o fricción de la carpeta asfáltica, para eso se analizó las mediciones hechas en un tramo de carretera, y así realizar una comparación de resultados tanto del Péndulo británico vs SCRIM.

Encontrando así la incidencia en el riesgo de accidentes con este valor promedio de fricción, ya que al haber un valor aceptable de fricción conllevará a que la carpeta asfáltica tenga una buena adherencia entre la interfaz neumático-pavimento, por consecuencia una mala adherencia entre estos elementos hace que la microtextura no tenga la aspereza adecuada que se necesita en la superficie de rodadura, así como también que sea demasiada pulida; estas dos condiciones finales de las mediciones con los equipos serian extremas y muy peligrosas ya que inciden en el riesgo de accidentes, puesto que afecta en el correcto frenado del vehículo.

Analizando los resultados y la importancia que tiene las mediciones de la microtextura de la carpeta asfáltica con los equipos de bajo rendimiento y alto rendimiento se obtuvo la incidencia en el riesgo de accidentes por un factor principal el cual es la adherencia.

Por lo tanto, la hipótesis alterna es válida y se rechaza la hipótesis nula.

5.5.2 Hipótesis Específica b).

Hipótesis alterna H-b):

Con la macrotextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de Bajo rendimiento (círculo de arena) y Alto Rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), incide en el riesgo de accidentes.

Hipótesis nula H-0:

Con la macrotextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (círculo de arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), no incide en el riesgo de accidentes.

Se analizó el ensayo del círculo de arena correspondiente al equipo de bajo rendimiento y por el lado de los equipos de alto rendimiento se analizaron al Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro inercial.

Con los cuales se hallaron el valor de la macrotextura en ciertos tramos de carretera, para así lograr realizar una comparación de resultados tanto del ensayo del círculo de arena vs Texturómetro o vs Perfilómetro Inercial.

Encontrando así la incidencia en el riesgo de accidentes con este valor promedio de macrotextura, ya que al haber una buena macrotextura conllevara a que la carpeta asfáltica tenga un buen Drenaje de las aguas superficiales presentes que pueda haber sido ocasionado por acción de lluvia o porque salió agua superficial de algún lugar, por consecuencia esta pista mojada se vuelve totalmente peligrosa ya que se da el fenómeno del Hidroplaneo.

Analizando los resultados y la importancia que tiene las mediciones de este valor de la Macrotextura de la carpeta asfáltica con los equipos de Bajo rendimiento y Alto rendimiento se obtuvo la incidencia en el riesgo de accidentes por un factor principal el cual es el Drenaje.

Por lo tanto, la hipótesis alterna es válida y se rechaza la hipótesis nula.

5.5.3 Hipótesis Específica c).

Hipótesis alterna H-c):

La textura de la carpeta asfáltica hallados con los equipos de medición incide en el riesgo de accidentes.

Hipótesis nula H-0:

La textura de la carpeta asfáltica hallados con los equipos de medición no incide en el riesgo de accidentes.

Al ser analizados los resultados de la microtextura y macrotextura de la carpeta asfáltica que se obtuvieron con los distintos equipos de medición, se hallaron los factores de incidencia en el riesgo de accidentes: Adherencia y Drenaje.

Se establece entonces que estas dos fases iniciales de la textura de la carpeta asfáltica y que sus valores adecuados son muy importantes para la seguridad de los usuarios ya que tienen gran incidencia en el riesgo de accidentes.

Por lo tanto, la hipótesis alterna es válida y se rechaza la hipótesis nula.

CONCLUSIONES

1. Se analizó la microtextura de la carpeta asfáltica con el equipo del Péndulo Británico dando un valor promedio de 0.65 como se refiere en la Fig. 102 y con el equipo SCRIM dando valores promedios en fricción de 0.75 como se refiere en la Fig. 100, así como también se identificó a la adherencia que da la microtextura como factor de incidencia en el riesgo de accidentes, ya que un valor adecuado de la microtextura nos dará una buena adherencia entre neumático-pavimento, y que una deficiencia de esta conlleva a la pérdida de la fricción, pero a su vez un elevado valor de microtextura producirá un mayor desgaste en los neumáticos, por lo cual es un gran peligro a la hora del frenado del vehículo, por esta razón la condición óptima de microtextura es que sea áspera, según: Pérez Zuriaga en su explicación sobre las características superficiales de los pavimentos.
2. Se analizó a la macrotextura de la carpeta asfáltica con el ensayo del círculo de arena y los equipos de Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial dando valores promedios aceptables, ver Tabla N° 20 y, Tabla N° 18 y 19 para cada equipo respectivamente, pero para el ensayo del círculo de arena se encontró deficiencias en sus mediciones ya que es estático y puntual, esto se demostró anteriormente que sumando el error del operador y del tamaño de la microesfera en este ensayo el resultado fue un aproximado del 40%, lo que esto conlleva a concluir que es un error considerablemente grande a la hora de la toma de mediciones, a su vez se identificó al drenaje que nos brinda la macrotextura como factor de incidencia en el riesgo de accidentes, ya que un valor alto de macrotextura nos dará una buena capacidad de drenaje en la interacción neumático-pavimento, y que un valor deficiente de macrotextura conlleva al fenómeno del hidropneumático, pero a su vez también al ser muy alto el valor hará que exista un elevado nivel de ruido, por esta razón la condición óptima de macrotextura es que sea gruesa o rugosa, según: Pérez Zuriaga en su explicación sobre las características superficiales de los pavimentos.

3. Como resultado de la investigación realizada se identifican los factores de incidencia en el riesgo de accidentes de las fases iniciales de la textura de la carpeta asfáltica los cuales son la adherencia y drenaje, ya que los equipos de alto rendimiento son las nuevas alternativas que pide la norma internacional actualmente, estos son equipos dinámicos y trabajan a nivel red, y a grandes velocidades, así como también no se requiere intervención del tráfico para la toma de sus mediciones.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar los equipos de alto rendimiento existente y usado en otros países, para una mayor eficiencia de las mediciones y disminuir la intervención del tráfico, para eso tenemos al Texturómetro, Perfilómetro Inercial, SCRIM, etc.
2. Se recomienda realizar las mediciones tanto de la macrotextura como la de la fricción en las zonas de rodadura y no en zonas donde no hay demasiada circulación de vehículos.
3. No se recomienda usar la caliza como agregado para las mezclas asfálticas ya que este agregado es muy pulimentable y no ayuda a la resistencia al desprendimiento de la carpeta asfáltica y por ende, su aspereza que se requiere de la microtextura.
4. Se recomienda incluir ensayos de pulimento para los agregados en los presupuestos de obra de carreteras.
5. Se recomienda realizar mediciones de macrotextura y microtextura en vías rápidas y por ende utilizar agregados adecuados para su realización y no solo efectuar el control de mediciones en grandes carreteras.
6. Se recomienda que la carpeta asfáltica tenga la aspereza adecuada para que a pesar de la acción de los neumáticos se mantenga a lo largo del tiempo, por lo que se requiere un agregado resistente al pulimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, E. (2011). *Evaluación del desempeño de tratamientos superficiales en carreteras de bajo volumen de tránsito-tramo Zúñiga-Dv. Yauyos*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería.
- Badilla, G., Elizondo, F. y Barrantes, R. (2008). *Determinación de procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI*. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1463/UI-03-08%20Determinaci%C3%B3n%20de%20un%20procedimiento%20de%20ensayo%20para%20el%20c%C3%A1lculo%20del%20IRI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barraza, G. (2004). *Resistencia al deslizamiento en pavimentos flexibles: Propuesta de Norma Peruana*. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Castro, F. (2021). *Macrotextura en pavimentos*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=eYGXCOQr6So>
- FDOT. (2020). *Herramienta mejorada de predicción de Hidroplaneo*. Florida.
- Fleites, L. (2017). *Resistencia al deslizamiento y textura superficial en pavimentos flexibles en la carretera rural Santa Clara – Manicaragua*. (Tesis de pregrado). Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba.
- Garnica, P. (2021). *Micro y macrotextura en seguridad vial*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=3vpF7Jyq-PQ>
- Garrido, R. (s. f.). *Introducción general griptester*.
- Guerreros, S. (2020). *Influencia del agregado y del %asfalto para la recuperación de la textura de pavimentos flexibles*. (Tesis de pregrado). Universidad Peruana Los Andes.

- Huamán, N. (2021). *Rugosidad de Pavimentos – Ingeniería Vial en Acción*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=baal4Eva8Eo>
- IMT. (2010). *Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregados*. [Informe técnico], Querétaro.
- Ipiates, E. (2019). *Estudio de la capa de rodadura de pavimento flexible en los accesos principales de Jipijapa*. (Tesis de pregrado). Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.
- Lesics (2021). *The importance of tire slip*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=tsnYqCRWTbE>
- Lua, E. (2019). *Estudio de la resistencia al deslizamiento en capas de rodadura mediante la evaluación del índice de fricción internacional (IFI), caso Michoacán*. (Tesis de posgrado). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Ministerio de Obras Públicas (2016). *Introducción descripción de equipos de auscultaciones*. Recuperado de <https://docplayer.es/80034897-Introduccion-descripcion-de-equipos-de-auscultaciones.html>
- Morante, H. (2019). *Pavimento flexible con tratamiento superficial para aeródromo de tráfico ligero*. (Tesis de pregrado). Universidad de Piura.
- Mundaca, J. (2019). *Evaluación del coeficiente de fricción del pavimento en 10 vías rápidas en Arequipa usando el péndulo de fricción británico TRRL*. (Tesis para título). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.
- Mundo Aeronáutico. (2020). *Hidroplaneo y condición de pista*. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=nQlhlMV_7ac&list=LL&index=26&t=9s
- Pavimentos. (2014). *Estabilidad química de los agregados*. Recuperado de <https://libro-pavimentos.blogspot.com/2014/06/estabilidad-quimica-de-los-agregados.html>

- Pérez, A. (2021). *Características superficiales de los pavimentos – Universitat Politècnica de València*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=5KJ1K2oiuuQ>
- Pérez, A. (2021). Valor del Pulimento Acelerado en los Agregados del País. Recuperado de Instituto Mexicano del Transporte: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=540&IdBoletin=193>
- Policía Nacional del Perú (2021). *Anuario Estadístico Policial 2021*.
- Ramirez, M. (2017). *Comportamiento del slurry seal a altitudes mayores de 3500 m.s.n.m. en mantenimiento de pavimentos flexibles de la ciudad de Puno*. (Tesis de pregrado). Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.
- Reyes, E. (2016). *Evaluación a la resistencia al deslizamiento de la vía Bucamaranga – Pamplona (K3+400 – K124+148) en el departamento de Santander*. (Tesis de posgrado). Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.
- Rivas, M. (2017). *Evaluación de la textura y la rugosidad de pavimentos flexibles mediante imágenes tomadas a partir de cámara no métrica Nikon Coolpix S2900*. (Tesis de posgrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- Rivera, C. (2017). *Evaluación del tratamiento superficial bicapa a nivel de ejecución, de la obra mejoramiento de la ruta AM-100, Bagua-La Peca; del circuito vial II - Amazonas*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca.
- Solminihac, H., Bustos, M., Echaveguren, T. y Caroca, A. (2004). Ecuaciones de correlación de la medida de resistencia al deslizamiento entre GripTester y Péndulo Británico. *Revista Ingeniería de construcción*, 19, 75-82.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2020). *Determinación de la macrotextura (MAC)*. México.
- Sornoza, Y. (2019). *Evaluación de las condiciones de seguridad y comodidad de la capa de rodadura de la avenida de los Choferes (km 1+044.62)*. (Tesis de pregrado). Universidad Estatal del Sur de Manabí, Ecuador.

ANEXOS

Anexo 1.

Matriz de consistencia

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA TEXTURA DE LA CARPETA ASFÁLTICA PARA HALLAR LA INCIDENCIA EN EL RIESGO DE ACCIDENTES

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿En qué medida los métodos TRRL, Círculo de Arena, Texturómetro basado en visión artificial, Perfilómetro Inercial, SCRIM, determinan la textura de la carpeta asfáltica para hallar la incidencia en el riesgo de accidentes?	Determinar la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos TRRL, Círculo de Arena, Texturómetro basado en visión artificial, Perfilómetro inercial, SCRIM para hallar la incidencia en el riesgo de accidentes, año 2022	Determinando la textura de la carpeta asfáltica aplicando los métodos TRRL, Círculo de Arena, Texturómetro basado en visión artificial, Perfilómetro Inercial, SCRIM, se halla la incidencia en el riesgo de accidentes	V.I.: Textura de la carpeta asfáltica	Métodos de medición	Métodos de bajo rendimiento	<u>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN:</u> Método: Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Recolección de datos: retrolectivo <u>TIPO DE INVESTIGACIÓN:</u> Descriptivo
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas			Métodos de alto rendimiento	
a. ¿De qué manera la microtextura de la carpeta asfáltica, hallado con los métodos de medición de bajo rendimiento (TRRL o Péndulo Británico) y alto rendimiento (SCRIM), incide en el riesgo de accidentes?	a. Analizar la microtextura de la carpeta asfáltica con los métodos de medición de bajo rendimiento (TRRL o Péndulo Británico) y alto rendimiento (SCRIM), que incide en el riesgo de accidentes	a. Con la microtextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (TRRL o Péndulo Británico) y alto rendimiento (SCRIM), incide en el riesgo de accidentes		Resistencia al deslizamiento	Microtextura	<u>NIVEL DE INVESTIGACIÓN:</u> Descriptivo, explicativo
			Macrotextura		<u>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:</u> No experimental, transversal, retrospectivo	

						<u>POBLACIÓN Y MUESTRA:</u> Única
b. ¿De qué manera la macrotextura de la carpeta asfáltica, hallado con los métodos de medición de bajo rendimiento (Círculo de Arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), inciden en el riesgo de accidentes?	b. Analizar la macrotextura de la carpeta asfáltica con los métodos de medición de bajo rendimiento (Círculo de Arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), que incide en el riesgo de accidentes	b. Con la macrotextura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición de bajo rendimiento (Círculo de Arena) y alto rendimiento (Texturómetro basado en visión artificial y Perfilómetro Inercial), incide en el riesgo de accidentes	V.D.: Incidencia en el riesgo de accidentes	Control del riesgo de accidentes vehiculares	Tráfico	<u>TÉCNICA:</u> Tesis, guías, normas y manuales
					Hidroplaneo	<u>INSTRUMENTOS:</u> Norma MTC E004 Norma ASTM E965
c. ¿En qué medida con la textura de la carpeta asfáltica hallados con los métodos de medición incide en el riesgo de accidentes?	c. Determinar la incidencia en el riesgo de accidentes con la textura hallada según los métodos de medición	c. La textura de la carpeta asfáltica, hallados con los métodos de medición, incide en el riesgo de accidentes				<u>ESTADÍSTICA A APLICAR:</u> Descriptiva

Fuente: Elaboración propia