



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TITULACIÓN DE INGENIERO CIVIL

Determinación de la textura superficial por el método del círculo de arena y mediante el software SPIP™ en pavimentos asfálticos.

TRABAJO DE FÍN DE TITULACIÓN

AUTOR: Esparza Aguirre, Sergio Stalin

DIRECTOR: Zúñiga Suarez, Alonso Rodrigo, M. Sc.

LOJA-ECUADOR

2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Magister.

Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: Determinación de la textura superficial por el método del círculo de arena y mediante el software SPIP™ en pavimentos asfálticos, realizado por Esparza Aguirre Sergio Stalin, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Enero de 2015

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Esparza Aguirre Sergio Stalin, declaro ser autor del presente trabajo de fin de titulación: Determinación de la textura superficial por el método del círculo de arena y mediante el software SPIP™ en pavimentos asfálticos, de la Titulación de Ingeniero Civil, siendo Alonso Rodrigo Zúñiga Suárez, director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.

Autor: Esparza Aguirre Sergio Stalin

Cédula: 1104371149

DEDICATORIA

A mi mami Edilma

A mi papá Sergio

A Mayra Alejandra y a mi princesa Victoria Alejandra

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios y a mi Santísima Virgen del Cisne.

Gracias mami por apoyarme en todo, gracias papi y gracias amor por darme las fuerzas necesarias.

Gracias a la Universidad Técnica Particular de Loja, a la titulación de Ingeniería Civil, al Ing. Alonso Zúñiga Suárez, director de tesis, por su tiempo, ayuda, orientación en el desarrollo y culminación de este trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----|
| CARATULA | i |
| APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN | ii |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS..... | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTOS..... | v |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | vi |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| CAPÍTULO I..... | 3 |
| 1. Introducción..... | 4 |
| 1.1 Marco de la tesis..... | 4 |
| 1.1.1 Antecedentes..... | 4 |
| 1.2 Objetivos. | 5 |
| 1.2.1 Generales..... | 5 |
| 1.2.2 Específicos. | 5 |
| 1.3 Marco teórico..... | 5 |
| 1.3.1 La superficie de rodadura. | 5 |
| 1.3.1.1 Características superficiales de los pavimentos..... | 6 |
| 1.3.2 Textura superficial. | 6 |

| | | |
|------------------|--|----|
| 1.3.2.1 | Definiciones de textura. | 7 |
| 1.3.2.2 | Medida de la textura de los pavimentos..... | 9 |
| 1.3.2.3 | Características que reúne la textura. | 10 |
| 1.3.3 | Hidroplaneo o aquaplaning. | 10 |
| CAPÍTULO II..... | | 12 |
| 2. | Estudio del estado del arte. | 13 |
| 2.1 | Agregados. | 13 |
| 2.1.1 | Caracterización..... | 14 |
| 2.2 | Aglomerantes. | 16 |
| 2.2.1 | Asfalto AC-20. | 16 |
| 2.2.2 | Asfalto modificado. | 19 |
| 2.3 | Pavimentos flexibles. | 19 |
| 2.3.1 | Mezclas asfálticas..... | 20 |
| 2.3.2 | Mezclas Asfálticas Drenantes..... | 20 |
| 2.3.2 | Mezclas Asfálticas Densas. | 22 |
| 2.4 | Metrología superficial..... | 22 |
| 2.4.1 | Perfil de la superficie..... | 23 |
| 2.4.2 | Área Topográfica superficial..... | 24 |
| 2.5 | Evaluación y parámetros de la Textura superficial. (ISO 25178 PARTE 2). | 25 |
| 2.5.1 | Parámetros de Campo. | 26 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| 2.5.1.1 | Parámetros de altura. | 26 |
| 2.5.1.2 | Parámetros espaciales. | 30 |
| 2.5.1.3 | Parámetros híbridos. | 33 |
| 2.5.1.4 | Funciones y parámetros relacionados. | 35 |
| 2.5.1 | Parámetros característicos del área. | 40 |
| 2.5.1.1 | Segmentación de Cuencas (Watershed). | 42 |
| 2.5.1.2 | Árbol de cambio y poda de Wolf. | 42 |
| 2.5.1.3 | Parámetros de presentación. | 44 |
| CAPÍTULO III. | | 47 |
| 3. | Metodología. | 48 |
| 3.1 | Losetas de mezcla asfáltica drenante. | 48 |
| 3.1.1 | Elaboración de losetas. | 48 |
| 3.1.2 | Número de losetas a elaborar. | 55 |
| 3.2 | Fuente para las pruebas en asfaltos con mezclas asfálticas densas. | 60 |
| 3.3 | Determinación de la textura superficial por el método del círculo de arena NLT 335/87. | 61 |
| 3.4 | MÉTODO GRÁFICO SOFTWARE SPIP. | 65 |
| 3.4.1 | Preparación de imágenes. | 66 |
| 3.4.2 | Resultados del método gráfico midiendo partículas y poros. | 68 |
| 3.4.3 | Resultados del método gráfico utilizando metrología superficial. | 68 |

| | |
|--|----|
| 3.5 Comparación de las texturas superficiales h obtenidas con el método del círculo de arena y con el programa SPIP™. | 69 |
| 3.6 Análisis de resultados..... | 73 |
| CAPÍTULO IV | 82 |
| 4.1 Conclusiones..... | 83 |
| 4.2 Recomendaciones..... | 85 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 86 |
| ANEXOS..... | 90 |

RESUMEN

La capa superficial del pavimento tiene una importancia en la satisfacción de los usuarios, la textura superficial se identifica como uno de los factores que contribuyen a la resistencia al deslizamiento de la superficie. En este trabajo se describe un experimento al usar una técnica con la utilización de fotografías para la obtención de los valores de la textura. Cámaras de alta gama permiten capturar imágenes de buena calidad, con el objetivo de mejorar la practicidad en la medida de la textura se propone un método mediante la utilización de fotografías y un software especializado en imágenes. Y se confirma una correlación en los resultados obtenidos y los expresados en la norma NLT 335/87 del círculo de arena.

PALABRAS CLAVE: Textura Superficial, Metrología, Asfalto Poroso, Asfalto denso.

ABSTRACT

The surface layer of the pavement has an importance in the user satisfaction, the surface texture is identified as one of the factors that contribute to the slip resistance of the surface. In this paper, an experiment is described using a technique using photographs for obtaining texture values. High-end cameras allow you to capture good quality images with the aim to improve the practicality in the measurement of the texture. A method is proposed using photographs and a specialized software images. And a correlation is confirmed in the results obtained and those expressed in the NLT 335/87 standard of the sand patch.

KEYWORDS: Surface Texture, Metrology, Porous Asphalt, Asphalt dense.

CAPÍTULO I

1. Introducción.

1.1 Marco de la tesis.

1.1.1 Antecedentes.

La superficie de rodadura de una vía es la capa superior de la misma, la que queda expuesta al tráfico o sencillamente lo que se observa superficialmente, esta superficie estará expuesta a factores endógenos y exógenos, factores que deberá soportar para no presentar fallas en la misma.

(Miró Recasens R. , 2006), indica que el firme de carretera tiene que proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura para la circulación de los vehículos. En las carreteras se pone atención a su función estructural y no tanto a su aspecto funcional, y este aspecto cada vez va teniendo más peso a medida que los usuarios y habitantes contiguos a las carreteras y vías urbanas exigen una mayor calidad y bienestar.

Las características funcionales de carreteras se observan fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción depende la funcionalidad observada por los usuarios. Algunas de estas características tenemos: el ruido en el exterior y en el interior de los vehículos, el levantamiento y la pulverización de agua en época de lluvia, la resistencia a la rodadura (que afecta el consumo de combustible), desgaste de neumáticos, etc.

Estos aspectos funcionales de carreteras están principalmente asociados con la textura superficial y regularidad superficial del pavimento.

Dentro de la textura superficial, las tolerancias de seguridad exigidas por Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (Cap. IV Pág. 167) indican que para la medida de la microtextura se determinará el coeficiente de rozamiento longitudinal medido por el Péndulo TRL (Británico) y será de mínimo 0.5, basándose en la norma ASTM E 303; mientras que para la macrotextura la exigencia mínima es de 0.5mm utilizando el ensayo de la mancha o círculo de arena (NLT 335-87).

El ensayo del círculo de arena menciona que a partir del volumen de arena utilizado y del área cubierta por la misma sobre el pavimento, se calcula una profundidad media de los

huecos rellenos por la arena, valor que puede utilizarse como medida de la textura superficial del pavimento.

La Universidad Técnica Particular de Loja, mediante sus laboratorios de Geología y Minas e Ingeniería Civil, adquirió un software especializado en imágenes llamado SPIP™, (Image Metrology, 2013) Mediante el cual se pueden elaborar histogramas de las variaciones de altura de una imagen, también medir la cantidad de poros o vacíos y partículas o materiales en un área definida con los cuales se puede cuantificar el volumen total de agujeros (vacíos) y salientes (materiales) de una superficie, con lo cual se puede llegar a relacionar estos valores con los valores dados por el ensayo de la mancha o círculo de arena; el programa utiliza la norma ISO 25178-2:2012(E), para la definición de la textura en una área determinada.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Generales.

- Relacionar los resultados proporcionados por el software procesador de imágenes SPIP™, y el ensayo del círculo de arena con su norma NLT-335/87 para establecer la textura superficial en pavimentos asfálticos.

1.2.2 Específicos.

- Medir a escala real, la textura superficial de pavimentos asfálticos porosos, a través de áreas experimentales desarrolladas en laboratorio.
- Establecer la textura superficial en mezclas asfálticas porosas con el 0, 1, 2 y 3 por ciento de polímero SBS añadido a la mezcla y su incidencia.
- Medir la textura superficial en asfaltos elaborados con mezclas cerradas.
- Determinar las condiciones óptimas de la toma de muestras para ser procesadas en el software SPIP™.

1.3 Marco teórico.

1.3.1 La superficie de rodadura.

(Crespo del Río, 1999) Menciona que vale diferenciar la “estructura” del “pavimento”, entendiéndolo primero como el conjunto de capas (incluida la subrasante o “cimiento” de la

vía) que constituyen toda la sección estructural, mientras que el pavimento es únicamente la capa superior cuya “cara vista” es una superficie que se denomina Capa de Rodadura. Por razones constructivas la capa de rodadura tiene un espesor que puede ir desde apenas 5 milímetros a 5 o 6 centímetros o más.

1.3.1.1 Características superficiales de los pavimentos.

La capa de rodadura entendida como la “estructura” y el “pavimento”, debe ser cómoda, duradera, segura y poco ruidosa para los usuarios de la vía, además debe producir un desgaste mínimo en las partes de los vehículos, y tener una evacuación rápida del agua cuando existe el contacto llanta-pavimento, para evitar que se produzca el hidropneumático.

Las características que se consideran importantes incluyen:

- Regularidad superficial
- Fricción o Resistencia al deslizamiento
- Textura Superficial

(Crespo del Río, 1999), menciona que las características superficiales de un tramo recién construido son homogéneas y por lo tanto se trata de un atributo general, aunque con el uso del pavimento pueden aparecer defectos localizados que deben ser estudiados como atributos locales.

La determinación de si un atributo es general o localizado es importante en términos de su medida. Los atributos generales, por pequeños que sean, normalmente se pueden medir usando procedimientos estadísticos aplicados sobre el área de análisis. Los atributos localizados sólo se miden fácilmente si se extienden sobre una área relativamente grande; los pequeños atributos localizados son los más difíciles de medir.

(Crespo del Río, 1999), indica que la capa de rodadura se la estudia analizando las líneas perpendiculares y paralelas al eje de la carretera es decir los perfiles longitudinales y transversales.

1.3.2 Textura superficial.

El (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Paraguay, 2011), define a la textura como el aspecto o característica de la superficie del pavimento que depende del tamaño,

forma, disposición y distribución del árido y del ligante asfáltico. Una mezcla densa que da una superficie suave tendrá una textura fina, cercana a 0.5 mm.; una superficie porosa tendrá una textura mayor (sobre los 2mm.). Las irregularidades de la superficie, tales como baches, escalonamientos de juntas y otras, no definen la textura.

La textura se encuentra relacionada con desviaciones de la superficie del pavimento respecto a una superficie plana menores o iguales a 50 milímetros, la textura superficial es la característica determinante en el nivel de ruido del tráfico, tanto del que perciben los ocupantes de los vehículos como el ruido de entorno que condiciona la calidad de vida de las zonas vecinas.

En el aspecto económico, la textura del pavimento influye en el consumo de gasolina, en el deterioro de los vehículos y sobre todo en el desgaste de los neumáticos.

1.3.2.1 Definiciones de textura.

En el Congreso Mundial de la AIPCR (Asociación mundial de la Carretera) en Bruselas en el año de 1987 se definieron tres bandas de textura:

- Microtextura
- Macrotextura y
- Mega textura.

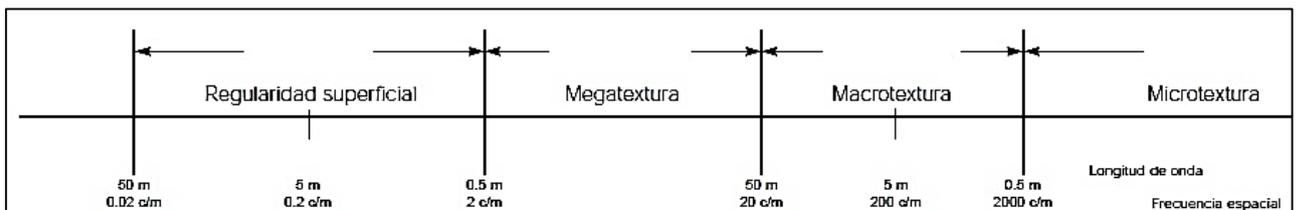


Figura 1: Bandas de textura

Fuente: Experimento internacional AIPCR de comparación y armonización de las medidas de textura y Se establecieron definiciones para las distintas formas de evaluar la textura.

Amplitud y longitud de la onda de textura: El perfil del pavimento se describe por el desplazamiento a lo largo de su superficie y por el desplazamiento en dirección normal a ella. Aquí se llama distancia al primero y amplitud al segundo. Se define la longitud de onda de textura como la distancia mínima existente entre partes de la curva que se repiten periódicamente en dirección longitudinal al plano del pavimento; En la figura 2 se observa la longitud y amplitud de onda de un pavimento.

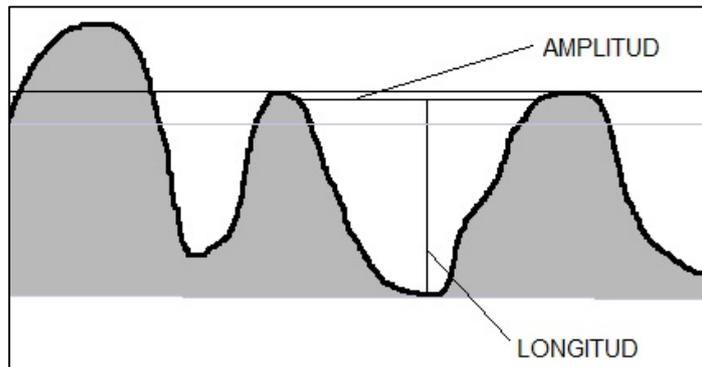


Figura 2: La longitud y amplitud de onda de un pavimento
Fuente: Esparza, S.

Microtextura: Son irregularidades de la superficie de un firme de carretera con dimensiones horizontales inferiores a 0.5 mm y con dimensiones verticales que oscilan entre 0 y 0.2 mm. La microtextura está relacionada con las asperezas del árido grueso, de las partículas de arena y de la superficie de rodadura en contacto con la goma de los neumáticos. Hace que la superficie se sienta más o menos rugosa pero normalmente es tan pequeña que no puede observarse a simple vista. (Asociación Técnica de Carreteras, Comité Español de la AIPCR, 2002)

Macrotextura: Son irregularidades de la superficie de una capa de rodadura con dimensiones horizontales que oscilan entre 0.5 y 50 mm y dimensiones verticales entre 0.2 y 10 mm la macrotextura está relacionada con el tamaño del árido, el diseño de la mezcla y la puesta en obra, así como con los tratamientos superficiales aplicados (si los hubiera). Tiene longitudes de onda del mismo orden que los dibujos de la banda de rodadura del neumático en el nivel de contacto neumático-carretera. (Asociación Técnica de Carreteras, Comité Español de la AIPCR, 2002)

Megatextura: La megatextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal entre 50 y 500 mm. La amplitud entre picos suele variar entre 10 y 50 mm. Este tipo de textura es la que presenta longitudes de onda del mismo orden que el neumático en el contacto con el pavimento (a menudo originadas por baches u ondulaciones). (A.I.P.C.R. Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras, Experimento internacional A.I.P.C.R. de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento, pág. 57).

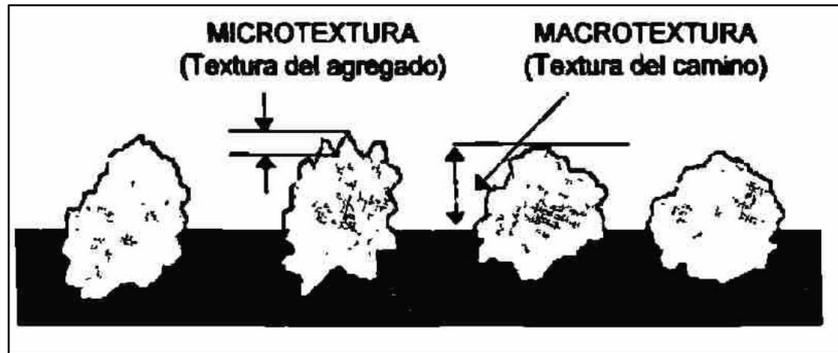


Figura 3: Microtextura y macrotextura de un pavimento
 Fuente: (Sandoval de León , 2000)

1.3.2.2 Medida de la textura de los pavimentos.

La forma más conocida de valorar la textura de un pavimento es con el Ensayo de la Mancha o Círculo de Arena. NLT 335-87, Se trata de un ensayo puntual que determina la profundidad (en milímetros de la textura) valorada como cociente entre el volumen conocido de una arena muy fina y homogénea, de grano con diámetro comprendido entre 0.17 y 0.25 milímetros (como valor medio se adopta 0.2 mm), que se extiende en el pavimento en una área sensiblemente circular, cuyo radio se mide. Este ensayo determina la macrotextura.

El cociente entre el volumen conocido y el área del círculo determina la altura o profundidad de la macrotextura del pavimento. A ese valor generalmente comprendido en una banda que va de 0.3-0.4mm a 2-3 mm se le llama altura H de la mancha de arena, (actualmente y según la definición anterior se debe designar por las siglas en ingles MTD-“Mean Texture Depth”) que define la profundidad media de la textura del pavimento.

El valor está muy ligado al tipo de pavimento que se construya. Así por ejemplo los tratamientos superficiales y los pavimentos de hormigón presentan valores de textura mayores que las mezclas bituminosas, y para éstas, el tipo de mezcla y el tamaño máximo del árido empleado definen una banda de valores de textura bastante amplia.

El ensayo es útil para valores de textura superiores a 0.25 mm.

El ensayo está normalizado en la mayoría de los países en España se describe en la Norma NLT-335/87. Y esta es la norma que se utilizará en el presente trabajo.

1.3.2.3 Características que reúne la textura.

(Niño & Ramírez, 2009), adiciona que la textura superficial debe reunir las siguientes características:

Debe ser homogénea tanto en sentido longitudinal como en sentido transversal al sentido de avance de los vehículos.

Cuanto mayor sea el valor de la microtextura mayor y mejor será la adherencia entre el neumático y la capa de rodadura. Sí ocurre lo contrario se produce un mayor desgaste de los neumáticos.

Cuanto mayor sea el valor de la macrotextura mejor será la capacidad de evacuación de agua en la interfase neumático pavimento, por contrario las texturas elevadas suelen ser más ruidosas. Este efecto contrario se trata principalmente con mezclas porosas cuyo elevado contenido de huecos junto con su elevada macrotextura negativa, permite una rodadura sin formación de película de agua en la superficie y además muy silenciosa.

En resumen la textura debe ser:

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

1.3.3 Hidroplaneo o aquaplaning.

Para la A.I.C.P.R. (Asociación Mundial de la Carretera) el hidroplaneo es la pérdida total de adherencia provocada por una lámina continua de agua que se interpone entre los neumáticos de un vehículo en movimiento y la capa de rodadura.

Se puede mencionar que el hidroplaneo o aquaplaning es un fenómeno que ocurre cuando se forma una película delgada de agua que llega a separar el neumático del pavimento, cuya característica es la pérdida absoluta de la adherencia. Es especialmente peligroso por lo difícil que es para el conductor advertir su suceso a través del volante, fenómeno que se produce repentinamente, y las ruedas pierden completamente el contacto con la calzada.

Para evitar este fenómeno es necesario tener, macrotextura que por la longitud de onda del tamaño del agregado grueso, es la que permite la evacuación del agua. Y la microtextura que por su aspereza conformada por el ligante y los finos o fillers de la mezcla.

Las dos texturas en niveles apropiados permiten disminuir las distancias de frenado con pavimento mojado.

Puesto que el hidropilano solamente puede ocurrir cuando hay agua en el pavimento, el riesgo de hidropilano de cada tramo de carretera se determina considerando la topografía del pavimento, su geometría superficial, su textura y su peralte, que determina la película de agua.

CAPÍTULO II

2. Estudio del estado del arte.

2.1 Agregados.

Agregado es cualquier material duro e inerte, usado en forma de partículas graduadas o fragmentos. Los agregados de acuerdo a su origen pueden clasificarse en:

- Agregados naturales.- Estos son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o con ningún procesamiento. Están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación. Los principales tipos de agregado natural usados en la construcción de pavimento son la grava y la arena.
- Agregados procesados. Son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Esto se hace debido a tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa, para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para mejorar la distribución de los tamaños de las partículas (graduación).

Los principales tipos de agregados usados en la elaboración del pavimento asfáltico son la grava y la arena; la grava se define usualmente, como partículas de un tamaño igual o mayor que 6.35 mm (1/4"). La arena se define como partículas de un tamaño menor que 6.35 mm (1/4") pero mayor que 0.075 mm (N° 200). Las partículas de un tamaño menor que 0.075 mm (N° 200) son conocidas como relleno mineral, el cual consiste principalmente en limo y arcilla.

En la capa de rodadura, los agregados pétreos constituyen la mayor parte del peso y del volumen. La capacidad de carga de la capa de rodadura es proporcionada esencialmente por los agregados, por lo que una selección adecuada y el buen manejo de estos materiales contribuyen en la construcción de un pavimento asfáltico de buena calidad.

Para lo cual las características de los materiales pétreos deben cumplir con las especificaciones normadas para cada uno de ellos, las cuales están relacionadas principalmente a su granulometría y a las características exclusivas del material.

Estas propiedades son:

- Graduación y Tamaño Máximo
- Limpieza
- Dureza
- Forma de la Partícula

- Capacidad de Absorción
- Peso Específico

2.1.1 Caracterización.

La granulometría es fuertemente discontinua, debido a que se elabora un asfalto drenante o poroso, con menor proporción de agregados intermedios o finos. Esta situación genera un esqueleto granular muy trabado con escasos puntos de contacto, requiriendo de los mismos:

Resistencia

Limpieza

Adecuada microtextura

Poseer una elevada proporción de caras obtenidas por fractura.

Los agregados utilizados en la investigación se obtuvieron en la planta de asfaltos del GAD municipal de Loja así como el asfalto.

Se realizó diferentes pruebas a los agregados utilizados en la investigación de los cuales se encuentra los siguientes resultados:

- Granulometría, utilizando la Norma INEN 696 o su equivalente la Norma ASTM C136-01, realizando el promedio de 5 ensayos se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 1: Husos granulométricos y resultados sin tamizar.

| TAMIZ | LIMITE 1 | LIMITE 2 | % PASANTE |
|-------|----------|----------|-----------|
| 1/2" | 100 | 100 | 100 |
| 3/8" | 85 | 100 | 100 |
| # 4 | 10 | 30 | 25 |
| # 8 | 0 | 10 | 14 |
| # 16 | 0 | 5 | 11 |

Fuente: Esparza, S.

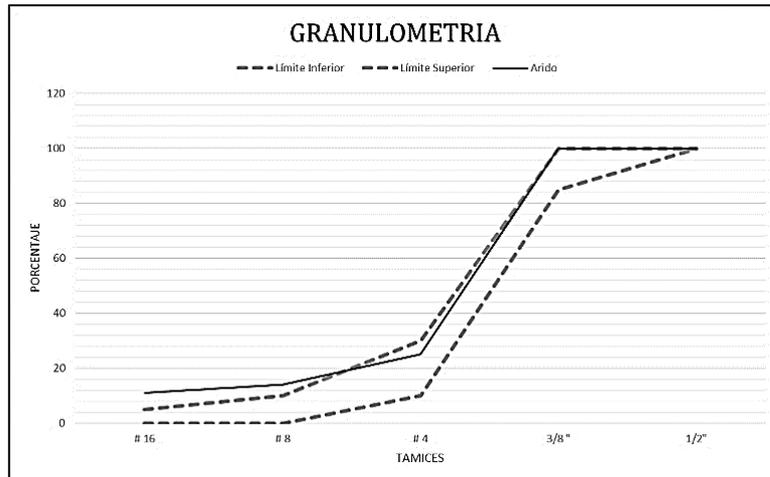


Figura 4: Curva granulométrica sin tamizar.
Fuente: Esparza, S.

En los resultados anteriores se denota una curva granulométrica con bastante presencia de partículas finas que pasan el tamiz #16, por consiguiente se realizó un tamizado de todo el material para desechar las partículas finas y así la curva granulométrica este dentro de los límites establecidos en la norma ASTM C33-03 para el agregado con el tamaño máximo nominal de 3/8". Y se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 2: Husos granulométricos y resultados luego de tamizar.

| TAMIZ | LIMITE 1 | LIMITE 2 | % PASANTE |
|-------|----------|----------|-----------|
| 1/2" | 100 | 100 | 100 |
| 3/8" | 85 | 100 | 100 |
| # 4 | 10 | 30 | 15 |
| # 8 | 0 | 10 | 4 |
| # 16 | 0 | 5 | 2 |

Fuente: Esparza, S.

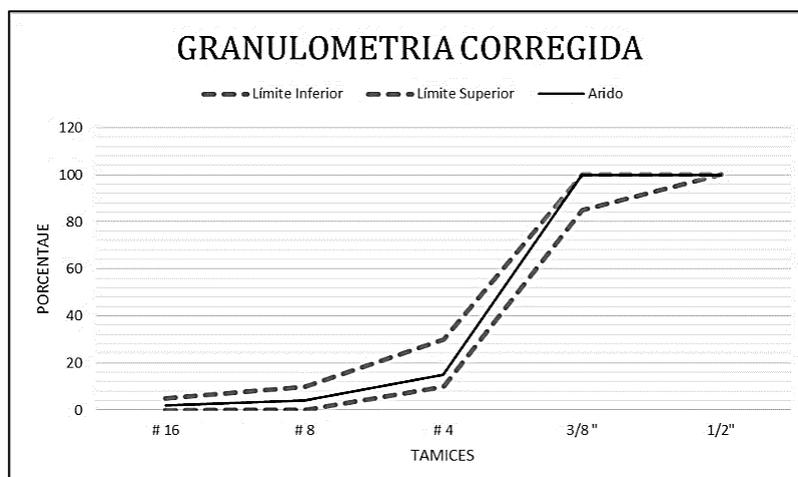


Figura 5: Curva granulométrica luego de tamizar.
Fuente: Esparza, S.

Así mismo se desarrolla los siguientes ensayos:

- Densidad y absorción de agua, utilizando la Norma INEN 857 o su equivalente la Norma ASTM C127-01, resultados en tabla 3.
- Valor de Abrasión en partículas menores a 37.5 mm., utilizando la Norma INEN 860 o su equivalente la Norma ASTM C131-96, resultados en tabla 3.
- Determinación de la masa unitaria y el porcentaje de huecos, utilizando la Norma INEN 858 o su equivalente la Norma ASTM C29-97(03), resultados en tabla 3.

Tabla 3: Ensayos de agregados.

| | | | |
|------------------------|-------------|---------|-------------------|
| DENSIDAD | ESTADO SECO | 2.56 | g/cm ³ |
| | ESTADO SSS | 2.61 | g/cm ³ |
| | APARENTE | 2.69 | g/cm ³ |
| ABSORCION DE AGUA | | 1.88 | % |
| PORCENTAJE DE ABRASION | | 33.22 | % |
| MASA UNITARIA | | 1464.49 | kg/m ³ |
| PORCENTAJE DE VACIOS | | 43 | % |

Fuente: Esparza, S.

2.2 Aglomerantes.

2.2.1 Asfalto AC-20.

La norma ASTM D8 indica que los asfaltos son: “Materiales aglomerantes sólidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que licuan gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo, o combinación de estos entre sí o con el petróleo o productos derivados de esta combinación”.

(Maila, 2013), menciona que el asfalto es un material que puede ser encontrado directamente en la naturaleza, en yacimientos naturales (lagos) o a través de la destilación del crudo de petróleo, lo cual resulta más económico. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, y adopta propiedades de un líquido newtoniano, lo cual permite cubrir las partículas del agregado durante la producción de la mezcla en caliente.

(Montejo Fonseca , Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, 2002), aclara que el Cemento Asfáltico (AC), es un ligante denso que a la temperatura ambiente es semisólido,

usualmente pegajoso. Estos se obtienen por destilación al vapor de los residuos más pesados del proceso de fraccionamiento, continuándose la destilación hasta obtener la consistencia deseada. Se aplica el vapor en el refinado para que los volátiles pesados puedan ser separados sin aumentar demasiado la temperatura, ya que temperaturas excesivamente altas reducen la ductibilidad, aumentan la fragilidad y producen desdoblamiento, dando lugar a un producto menos homogéneo.

La calidad de un cemento asfáltico viene afectada por la propiedad del crudo, que pueden variar mucho aún dentro de un mismo yacimiento y también por el sistema de refinación que se haya empleado.

En Ecuador, PETROECUADOR, produce cementos asfálticos en la refinería de Esmeraldas, que por sus características físicas de penetración (según el MTOP 60-70 u 85-100 mm/10) produce el asfalto conocido como AC-20. La norma INEM en el Ecuador brinda los requisitos para este asfalto que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4: Requisitos para cemento asfáltico.

| ENSAYO | UNIDAD | MÉTODO | | ESPECIFICACIÓN | |
|--------------------------------|---------|--------|------|----------------|------|
| | | ASTM | INEN | Mín. | Máx. |
| Viscosidad Absoluta a 60°C | Pa.s | D2171 | - | 200 ± 40 | |
| Viscosidad Cinemática 135°C | cSt | D2170 | 810 | 240 | - |
| Penetración 25°C, 100g. 5s. | 1/10 mm | D5 | 917 | 40 | |
| Punto de Inflamación | °C | D92 | 808 | 232 | - |
| Ductilidad 25°C 5cm/min | Cm | D113 | 916 | 100 | - |
| Solubilidad en Tricloroetileno | %m/m | D2042 | 915 | 99 | - |

Fuente: INEN 2515, Productos Derivados de Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación por Viscosidad), Quito. 2010. p 4.

En el trabajo realizado por (Sosa J. C., 2012), el asfalto AC-20 producido por la refinería de Esmeraldas cumple con todos los requisitos establecidos en la norma INEN 2515, para el cemento asfáltico.

Mientras que la investigación desarrollada por (Granda, 2012) presenta la siguiente tabla de la caracterización del asfalto AC-20 producido en la refinería de Esmeraldas:

Tabla 5: Resultados de la caracterización del asfalto.

| ENSAYO | UNIDAD | MÉTODO | RESULTADO |
|---|---------|-------------|-----------|
| Penetración 25°C, 100g. 5s. | 1/10 mm | ASTM D-5 | 90 |
| Viscosidad Saybolt, SSF a 135°C | SSF | ASTM D-88 | 199.8 |
| Viscosidad Cinemática 135°C | cSt | ASTM D-2170 | 428.5 |
| Punto de Inflamación en Copa Abierta de Cleveland | °C | ASTM D-92 | 256 |
| Ductilidad 25°C 5cm/min | cm | ASTM D-113 | 136.3 |
| Solubilidad en Tricloroetileno | %m/m | INEN 915 | 99.6 |
| Perdidas por Calentamiento | %m/m | INEN 924 | 0.28 |
| Punto de Ablandamiento | °C | ASTM D-36 | 48 |

Fuente: Granda, F. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DEL ASFALTO PRODUCIDO EN LA REFINERÍA ESTATAL DE ESMERALDAS, Quito. 2012. p 77.

El asfalto utilizado en la presente investigación se obtuvo en la planta de asfaltos del GAD Municipal de la ciudad de Loja, asfalto proporcionado por Petroecuador a dicha planta, este asfalto viene con la tabla característica (figura 6) desde la planta de producción la cual no difiere mucho de los datos obtenidos por (Sosa J. C., 2012) y (Granda, 2012). De lo cual se puede decir que el asfalto cumple la normativa para un asfalto AC-20.

| DATOS DEL CLIENTE | | | | MUESTRA: | | | | | |
|---|--|--|--------|--|----------------|-------------------------------------|-----------|---------------|--|
| NOMBRE: | | ING. LUIS FEJOO (INTENDENTE DE REFINACIÓN) | | CEMENTO ASFALTICO GRADO DE VISCOSIDAD | | | | | |
| DIRECCIÓN Y TELEFONO: | | Km 7 1/2 ANTIGUA VÍA A ATACAMES 62700174 | | | | | | | |
| SOLICITADO POR: | | ING. REMIGIO PACHECO (COORDINACIÓN SENIOR DE PROGRAMACIÓN, TRANSFERENCIA Y ALMACENAMIENTO) | | | | | | | |
| | | | | NORMA: | | NTE INEN 2515-2010 | | | |
| ORIGEN MUESTRA | | AO-V16 | | FECHA MUESTRA: | | FECHA INICIAL ANÁLISIS: FECHA FINAL | | | |
| | | | | 16/10/2013 | | 16/10/2013 16/10/2013 | | | |
| LUGAR DE TOMA: | | SETRIA | | DATOS ANÁLISIS | | | | | |
| PUNTO DE MUESTREO: | | AFORO DEL TANQUE | | | | | | | |
| HORA DE MUESTREO: | | 11h00 | | | | | | | |
| CANTIDAD: | | 1500 ml | | | | | | | |
| | | TEMPERATURA: 24.7 °C / 76.5°F | | HUMEDAD: 73.4 % RM | | PRESIÓN: 758.5 mmHg | | | |
| REQUISITOS | | UNIDAD | MÉTODO | | ESPECIFICACIÓN | | RESULTADO | INCERTIDUMBRE | |
| | | | ASTM D | NTE INEN | MÍN. | MÁX. | | | |
| Gravedad API a 60°F (15.6°C) | | | 1298 | 319 | REPORTE | - | 5.8 | N/A | |
| Densidad Relativa 60/60°F (15.6/15.6°C) | | | 1298 | 319 | REPORTE | - | 1.0306 | - | |
| Penetración 77°F (25°C). 100g. 5s min. | | 1/10mm | 5 | 918 | 60 | - | 75 | - | |
| Punto de Inflamación, Copa Abierta de Cleveland, min | | °F (°C) | 92 | 808 | 450(272) | - | 298 | - | |
| Viscosidad Cinemática 275°F (135°C). Min. | | cSt | 2170 | 810 | 300 | - | 352 | - | |
| Solubilidad en Tricloroetileno | | %m/m | 2042 | 915 | 90 | | 99.93 | - | |
| Viscosidad Absoluta, 140°F (60°C). 300 mmHg | | Poise. P | 2171 | 810 | 1600 | 2400 | 1716 | - | |
| Análisis al residuo de la prueba de CALENTAMIENTO EN PELICULA DELGADA, 163°C. | | | 1754 | | | | - | - | |
| Ductilidad 77°F (25°C). 5cm/min. | | cm | 123 | 916 | 50 | - | 52 | - | |
| Viscosidad Absoluta, 140°F (60°C). Máx. 300 mmHg | | p | 2171 | 610 | | 10000 | 5836 | - | |
| API OBSERVADO: | | | | | | | | 15.7/242.6°F | |

Figura 6: Informe de resultados de análisis reológico del asfalto del GAD Municipal de Loja.

Fuente: Planta de asfalto GAD Municipal de Loja.

2.2.2 Asfalto modificado.

Un asfalto modificado es el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de caucho molido de neumático, estas son sustancias estables resistentes al tiempo y a cambios de temperatura, las cuales permiten modificar las propiedades físicas y reológicas del asfalto, como disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y a la oxidación.

Los polímeros son sustancias formadas por la unión, de cientos o miles de moléculas pequeñas, llamadas monómeros, (compuestos químicos con moléculas simples). Que constituyen moléculas gigantes que toman diversas formas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

(Montejo Fonseca , Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, 2002), indica que la modificación del asfalto con la incorporación de polímeros da por resultado una mejoría considerable en las características de elasticidad, adherencia y cohesión de estos a un costo competitivo.

El asfalto modificado utilizado en la presente investigación proviene de la dispersión del polímero SBS que se realiza en las instalaciones de CHOVA DEL ECUADOR.

El polímero SBS (estireno-butadieno-estireno), son elastómeros o cauchos, por lo cual es un polímero lineal amorfo, generalmente insaturado, que sometido al proceso de vulcanización adquieren una estructura parcialmente reticulada, que le confiere sus propiedades elásticas.

El objetivo con la adición del polímero SBS es contar con un ligante más viscoso a temperaturas elevadas y reducir las deformaciones aumentando su rigidez. Y también de contar con un ligante de mejores características adhesivas. Además con la utilización del polímero se busca determinar el porcentaje óptimo para que el asfalto tenga una textura eficiente.

2.3 Pavimentos flexibles.

(Montejo Fonseca , Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, 2002), Menciona que los pavimentos se encuentran formados por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, cuyo diseño y construcción se realiza con materiales apropiados y

adecuadamente compactados. Así, los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la sub-base. Al igual se puede relegar alguna de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

Un pavimento flexible es aquel que utiliza una mezcla de betún con áridos en su capa de rodadura, los que pueden dosificarse de acuerdo a las necesidades requeridas de la vía; en su estructura contiene una base y sub-base granulares las que pueden ser omitidas.

2.3.1 Mezclas asfálticas.

Las mezclas bituminosas o asfálticas se emplean desde inicios del siglo pasado en las capas superiores de los pavimentos, no solo de carreteras y aeropistas, sino también en otro tipo de infraestructuras.

Las mezclas asfálticas, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico, de manera que los agregados quedan cubiertos por una película continua del ligante. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, etc...

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto.

La mezcla se deberá diseñar y construir de modo que no solo preste una función estructural, sino que además, resista la fuerza abrasiva del tránsito, proporcione una superficie antideslizante y uniforme y prevenga la penetración del agua superficial, o en el caso de pavimentos drenantes permita el paso del agua.

La determinación del porcentaje óptimo de asfalto que debe intervenir en la mezcla, depende básicamente del objetivo buscado.

2.3.2 Mezclas Asfálticas Drenantes.

(Montejo Fonseca , Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, 2002) Indica que las mezclas asfálticas drenantes o porosas se caracterizan por tener un porcentaje muy elevado de

vacíos en la mezcla (superior al 20%) y una proporción de agregado fino muy baja (inferior al 20%), por lo que el ligante debe tener una buena cohesión para evitar la disgregación de la mezcla. De esta manera un pavimento drenante sería aquel que por su alto contenido de vacíos permitirá que en él se filtre las aguas lluvias con mayor rapidez, para ser evacuada hacia los elementos de drenaje que contenga la vía, de esta manera evitar que el agua permanezca en la capa de rodadura.

El elevado porcentaje de vacíos, se logra mediante el uso de una granulometría especial: un alto porcentaje de agregados gruesos (alrededor del 85%), poco fino y bajo aporte de filler. El uso de las mezclas drenantes o porosas, cambia el concepto usualmente utilizado que una capa de rodadura sea totalmente impermeable, así la función de proteger de los efectos negativos del agua quedan relegados a la capa inmediata inferior, la misma que deberá ser impermeable y con un diseño geométrico que asegure el escurrimiento del agua hacia los drenes laterales y que la misma no se infiltre a capas inferiores de la vía.

Cuando sea necesario se puede fabricar asfaltos modificados con polímeros para elaborar mezclas drenantes en frío con propiedades similares a las de caliente y con las ventajas de empleo de tecnología en frío.

(Rodríguez Hernández, 2008) menciona que los pavimentos drenantes o porosos fueron desarrolladas en Francia en 1968, donde pasados diez años, aún colmatadas, mantenían una buena rugosidad superficial y un aceptable drenaje superficial. A mediados de los años setenta, la utilización de betunes modificados con polímeros permitió mejorar sus características reológicas y de adherencia aumentando su cohesión y disminuyendo su susceptibilidad térmica. En España, las mezclas bituminosas porosas se utilizan en carreteras desde 1980 como capa de rodadura drenante, con espesores de 3 o 4 cm, e incluso de 5 cm, cuando el tamaño máximo de los áridos es de 12 mm. Posteriormente, con el paso de los años, la experiencia y la investigación, el uso de mezclas bituminosas se ha extendido por todo el mundo, adaptándose a todo tipo de condiciones climáticas y técnicas correspondientes a países como Suiza, Japón, Malasia o China. Las principales conclusiones de los primeros estudios de laboratorio sobre las dosificaciones de pavimentos drenantes o porosos fueron:

- Aumentando el contenido de betún y de filler se limita la desagregación pero disminuye la porosidad de las mezclas resultantes.

- Según las proporciones, la porosidad disminuye más al aumentar el porcentaje de betún que al aumentar el contenido de filler.

2.3.2 Mezclas Asfálticas Densas.

Se definen las mezclas densas en frío como la combinación de un ligante bituminoso con agregados minerales bien gradados granulométricamente, con un elevado porcentaje de finos y que es posible fabricar, extender y compactar a temperatura ambiente.

Los asfaltos densos o también llamados “Mezclas Cerradas”, se caracteriza por tener un bajo porcentaje de huecos (entre el 3 al 6%) lo que hace que su permeabilidad sea muy baja, por lo tanto no permite que el agua filtre a las capas subyacentes. Esta mezcla tiene una combinación de un ligante bituminoso con agregados minerales bien gradados granulométricamente con un alto porcentaje de finos que permite fabricar, extender y compactar en caliente. Mezcla altamente utilizada en el Ecuador.

2.4 Metrología superficial.

¿Qué es una superficie?- Como un buen comienzo es necesario considerar a la superficie como un límite, la superficie se definirá como la característica de un componente o dispositivo que interactúa con el medio ambiente en el que el componente se encuentra o en la que el dispositivo funciona, o con otra superficie. (Leach, 2013).

(Whitehouse, Handbook of surface and nanometrology, 2011), dice que la metrología superficial es la medición de las desviaciones de una pieza de trabajo a partir de su forma deseada, eso es, desde la forma indicada en el plano. En estas medidas incluyen características tales como desviaciones de redondez, rectitud, planitud, cilindricidad, etc. También se incluye la medida de la textura superficial, formada naturalmente por el proceso de elaboración del objeto.

También (Whitehouse, Handbook of surface and nanometrology, 2011), menciona que la textura superficial son las irregularidades en una superficie después de la fabricación del objeto elaborado. En el tendido del material la máquina encargada de esto irá describiendo una dirección patrón predominante en la superficie la que es necesario caracterizar y medir. La medida de la textura superficial aérea se la realiza con la ayuda de cámaras fotográficas, escáneres o microscopios ópticos y electrónicos, dependiendo de la escala en la cual se pretende medir, encontrándose la topografía del elemento en análisis; en el caso de

secciones transversales a la superficie las mediciones se realiza con instrumentos de lápiz ópticos para describir el perfil topográfico.

La topografía de una superficie es de gran importancia, porque puede afectar a cómo se deslizan dos objetos que van juntos. La medida para describir la confiabilidad de la superficie es su textura o rugosidad.

La caracterización de la topografía superficial es una rama de la metrología. Ahora, por las recientes investigaciones, se ha establecido una amplia normativa internacional coherente para apoyar la caracterización de la textura superficial. En ISO 4287:97 y en ISO 5436:2012 “Geometrical product specification - Surface texture: Profile method” revisa la textura superficial por el método del perfil. Mientras que una caracterización por método de área se describe en ISO 25178:2012 “Geometrical product specification - Surface texture: Areal”. Este trabajo esta direccionado a la caracterización de la textura superficial por el método de área. Blateyron, F. (The Areal Field Parameters, 2013) y Blunt, L. (The History and Current State of 3D Surface Characterisation, 2003), describen una breve historia sobre la norma ISO 25178:2012, en la que indica sus inicios y su evolución hasta la actualidad.

2.4.1 Perfil de la superficie.

La medición del perfil de la superficie se consigue mediante la medición de una línea a través de la superficie, línea que representa matemáticamente como una función de la altura con un desplazamiento lateral, $Z = f(x)$. Cuando se realiza la medición y caracterización de textura superficial, se hace uso de un plano de coordenadas, en la que el eje X proporciona la dirección de la línea, el eje Y es la superficie real, y el eje Z es la dirección hacia el exterior desde el material al medio circundante, figura 7. (Leach, 2013).

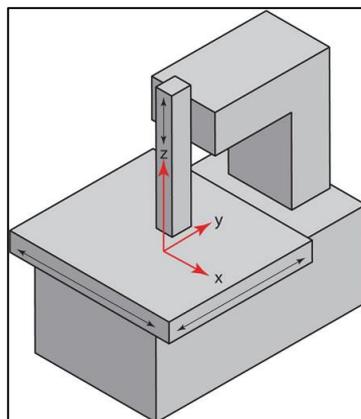


Figura 7: Sistema de coordenadas para la medida de textura por el método del perfil.

Fuente: (Leach, 2013)

Existen diferentes métodos para obtener el perfil de la superficie, ya sea con un lápiz óptico (instrumento de exploración óptica), donde el lápiz atraviesa una línea en la superficie. Con un instrumento óptico de área, donde el perfil es obtenido mediante un software luego de la medición del área, figura 8.

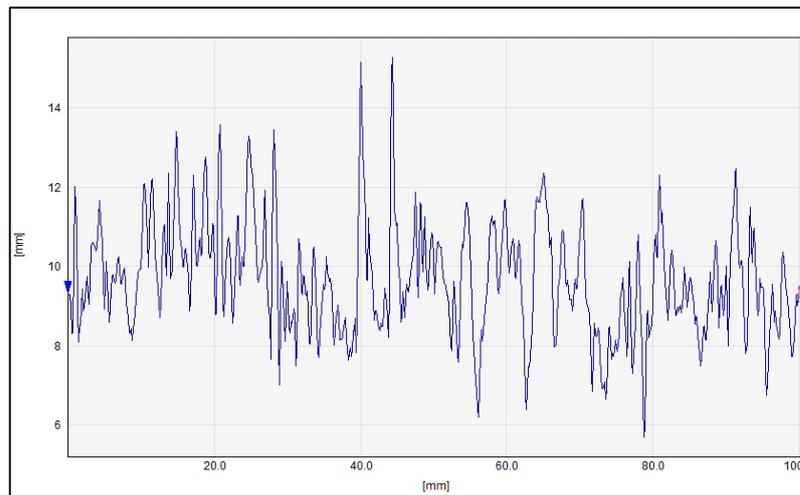


Figura 8: Perfil obtenido mediante software SPIP™.
Fuente: Esparza, S.

Cuando se realizan mediciones con instrumentos ópticos, la norma ISO 4287 establece ciertos parámetros que se deben considerar, como la perpendicularidad de los instrumentos a la dirección del objeto a examinar. La presentación del perfil que se está evaluando se ve afectada por la dirección de la vista respecto a la dirección del objeto y es importante tener esto en cuenta en la interpretación de los parámetros de textura superficial. (Leach, 2013)

El método del perfil se ha utilizado durante más de un siglo, es relativamente fácil de aplicar, y es el método más utilizado para la caracterización de la superficie.

2.4.2 Área Topográfica superficial.

(Leach, 2013), refiere que existe una serie de diferencias significativas entre el método del perfil y el análisis de área. En primer lugar, la mayoría de los parámetros mencionados en 2.4.1 requieren de una caracterización por área para predecir o controlar su función. Toda la información acerca de la superficie, se puede obtener a partir de un análisis topográfico del área.

Además, con la medición de perfiles y su caracterización a menudo es difícil determinar la naturaleza exacta de una característica topográfica. Como por ejemplo en un perfil no se puede diferenciar entre un pozo o un valle, mientras que con un análisis de área se puede apreciar que un pozo en un perfil en realidad es un valle, esto se demuestra en la figura 9.

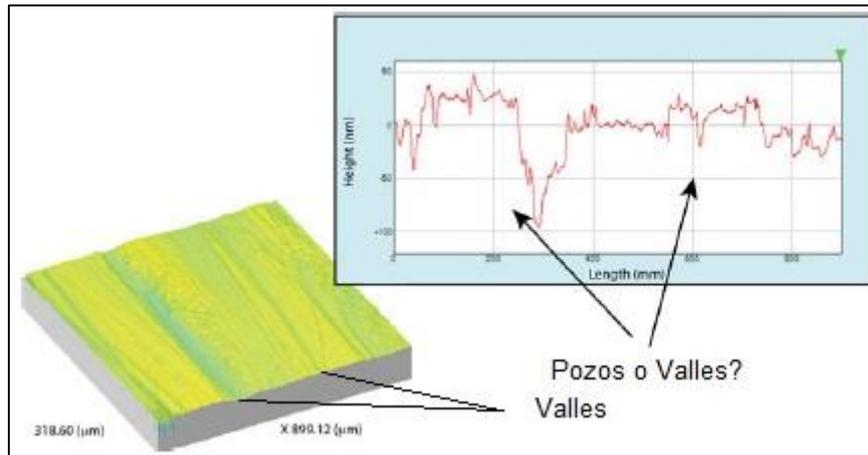


Figura 9: Comparación entre perfil y área.

Fuente: Leach, Richard, Characterisation of Areal Surface Texture, pp. 6.

También es necesario acotar que una medición por métodos de área tendrá mayor significancia estadística debido a que existirán mayores datos y además un mapa de área es una representación más cercana de la superficie real, Figura 10.

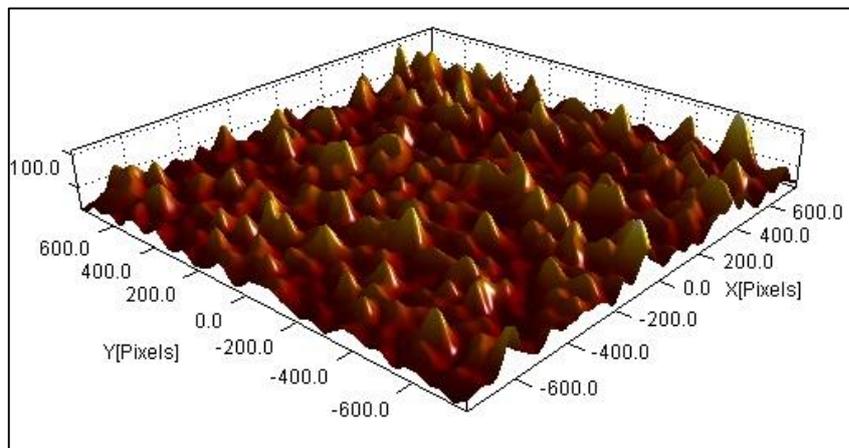


Figura 10: Imagen topográfica de un pavimento.

Fuente: Esparza, S.

2.5 Evaluación y parámetros de la Textura superficial. (ISO 25178 PARTE 2).

La gran mayoría de los parámetros de la textura superficial, son los parámetros de campo. El término campo se refiere a la utilización de cada dato medido en la zona evaluada, en lugar de presentar los parámetros que sólo tienen en cuenta puntos específicos, líneas o

áreas. Los parámetros de campo permiten la caracterización de la altura de la superficie, las pendientes, la complejidad, el contenido de la longitud de onda, etc., El documento principal que define los parámetros de área, es la norma ISO 25178 parte 2.

(Blunt & Jiang, 2003) Señalan que los parámetros de campo consisten en el conjunto de parámetros S y el conjunto de parámetros V. Los parámetros S dependen de la altura de la amplitud y de la longitud de onda, para la descripción de la amplitud y la información espacial. Mientras que los parámetros V dan información fundamental basada en la curva de relación del material o también llamada curva de Abbott-Firestone.

Ahora a diferencia de los parámetros de campo, donde se toma cada punto de la superficie en cuenta en el cálculo; la categoría de los parámetros de presentación, sólo tiene en consideración las características identificadas en la superficie. Las características se consideran son por ejemplo, las grandes cumbres (picos), colinas y valles. Las características más significativas se identifican por la segmentación de la superficie y son seleccionadas por un método conocido como la poda. Los parámetros se calculan entonces para cuantificar las características de las tipologías seleccionadas. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

ISO 25178 parte 2 define los símbolos de los parámetros de la textura superficial, símbolos que tienen un prefijo que es las letras mayúsculas S o V seguido de una o varias letras pequeñas que forman el sufijo. El prefijo S se utiliza para la mayoría de los parámetros (por ejemplo, Sq, Sdr, SMR), el prefijo V se utiliza en los parámetros de volumen (por ejemplo, Vmp, VVC).

2.5.1 Parámetros de Campo.

2.5.1.1 Parámetros de altura.

Los parámetros de altura se dan a continuación:

Altura “Root Mean Square” (RMS), Sq. - Es un parámetro de dispersión definido como el valor cuadrático medio de los valores de las ordenadas de la superficie, $z(x, y)$, dentro de la zona de muestreo, área (A).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy} \quad (1)$$

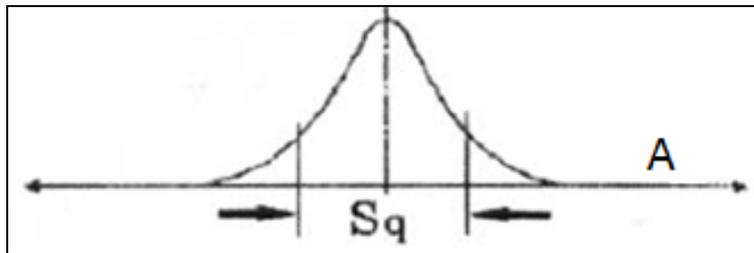


Figura 11: Desviación estándar de una superficie Sq

Fuente: Blunt, L. y Jiang, X. Advanced Techniques for Assessment Surface Topography, pp. 21

Altura media aritmética, Sa.- La altura media aritmética o parámetro Sa se define como la media aritmética de los valores absolutos de la altura dentro del área de muestreo, (A).

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (2)$$

Los parámetros Sa y Sq están fuertemente relacionados entre sí (Blunt y Jiang 2003). El parámetro Sq tiene un significado más estadístico (desviación estándar), estos parámetros se muestran en la Figura 12.

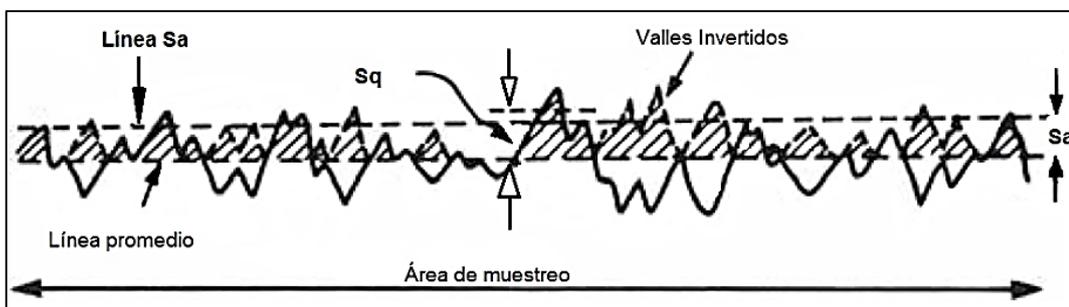


Figura 12: Parámetros promedio Sa y Sq

Fuente: Whitehouse, D. Handbook of surface and nanometrology, pp. 12

Sa analógicamente a Ra aplicada al uso en el análisis de perfiles, (Whitehouse, Handbook of surface and nanometrology, 2011), se define a la altura, en relación a una línea media de referencia. Por lo tanto, Sa será la altura medida desde la línea media de referencia y A será el área de muestra. Ahora en el caso del ensayo del círculo de arena (NLT 335/87), H se describe como la profundidad media de los huecos rellenos por el volumen de arena conocida, cubriendo un área que se conoce su diámetro.

Sa= altura medida desde la línea media de referencia.

H= Altura o profundidad media de la arena en un área conocida.

Véase figura 12 y 37, y se puede observar analogía existente entre los parámetros Sa y H de círculo de arena.

Asimetría, Ssk.- es el cociente del valor cuadrático medio de los valores de las ordenadas (Sq), elevadas al cubo dentro de un área definida (A).

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^3(x, y) dx dy \right] \quad (3)$$

El parámetro Ssk puede ser utilizado eficazmente para describir la forma de la distribución de la altura topográfica. Este parámetro puede ser positivo, negativo o cero. Para una superficie con una distribución de la altura al azar (o gaussiana) que tiene una topografía simétrica, la asimetría es cero. La asimetría será negativa si la distribución tiene una cola más larga en el lado inferior del plano medio de referencia o positiva si la distribución tiene una cola más larga en el lado superior de plano medio de referencia. La asimetría se muestra en la figura 13.

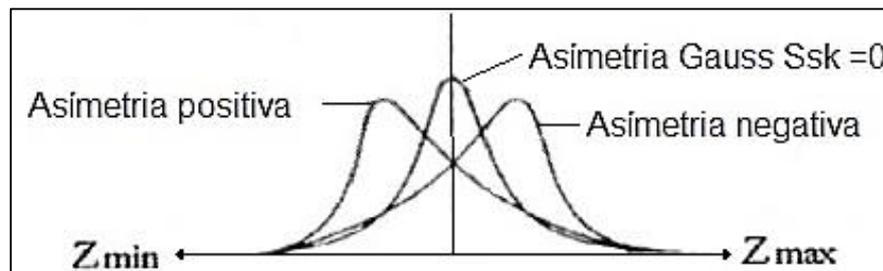


Figura 13: Parámetros de asimetría Ssk.

Fuente: Blunt, L. y Jiang, X. Advanced Techniques for Assessment Surface Topography, pp. 21

Kurtosis, Sku.- El parámetro Sku mide la nitidez en la distribución de la altura de la superficie y es la relación del valor cuadrático medio de los valores de las ordenadas a la cuarta potencia y la cuarta potencia de Sq el área de muestreo, (A).

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A Z^4(x, y) dx dy \right] \quad (4)$$

La Kurtosis es estrictamente positivo, y caracteriza a la propagación de la distribución de la altura. Una superficie con una distribución gaussiana tiene un valor de kurtosis de tres. A diferencia de Ssk, el uso de este parámetro no sólo detecta si los picos de perfil se distribuyen de manera uniforme sino que también proporciona una medida de que si la zona es puntiaguda o no. Una superficie con mayor presencia de picos, tendrá un valor alto de

kurtosis y una superficie llena de baches o valles, tendrá un valor bajo kurtosis, como se muestra en la figura 14.

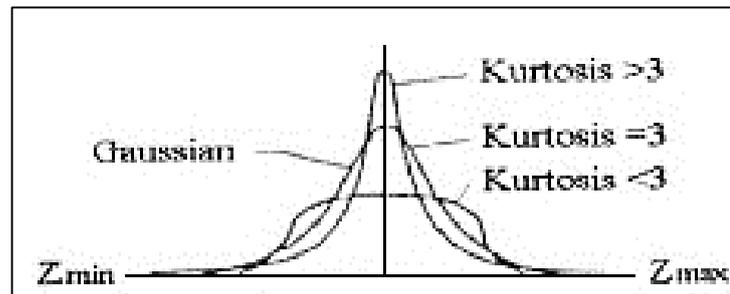


Figura 14: Parámetros de kurtosis, Sku .

Fuente: Blunt, L. y Jiang, X. *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography*, pp. 21

(Blateyron, *The Areal Field Parameters*, 2013), menciona que los parámetros Ssk y Sku pueden ser menos estables matemáticamente que otros parámetros, puesto que utilizan potencias de orden superior en sus ecuaciones, dando lugar a la propagación de errores más rápido.

La altura máxima de un pico en la superficie, parámetro Sp .- representa la altura máxima del pico, es decir, la altura del punto más alto de la superficie de análisis.

Altura máxima de un valle en la superficie, parámetro Sv .- parámetro que representa la altura máxima de un valle, es decir, la altura del punto más bajo de la superficie en análisis.

Como alturas se cuentan desde el plano medio, Sp es siempre positivo y Sv es siempre negativo.

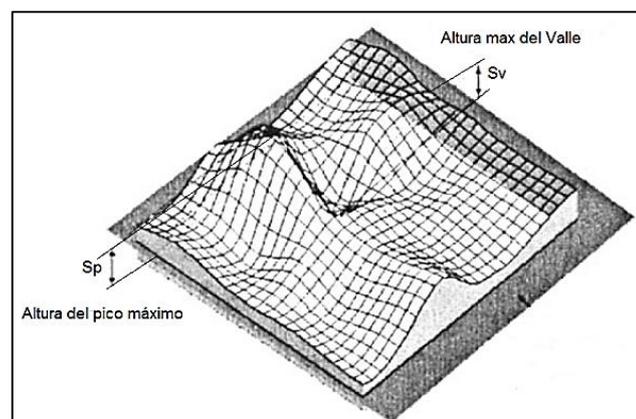


Figura 15: Parámetros de altura, Sp y Sv .

Fuente: Blunt, L. y Jiang, X. *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography*, pp. 22

Altura máxima de la superficie, parámetro Sz.- es la altura máxima de la superficie, es decir, es la suma de los valores absolutos de Sp y Sv.

$$Sz = Sp + |Sv| = Sp - Sv \quad (5)$$

(Blateyron, New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology, 2006), recomienda que los parámetros de altura se deben usar con precaución, ya que son sensibles a picos o valles aislados que no pueden ser significativos.

2.5.1.2 Parámetros espaciales.

(Blunt & Jiang, 2003) Refiere que estos parámetros indican las propiedades espaciales de las superficies y depende principalmente de la información obtenida en el escaneo de la superficie y de las direcciones de rastreo de la misma. Estos parámetros están diseñados para evaluar la densidad de los picos, y la resistencia de la textura. Así mismo son útiles para distinguir entre superficies con una textura elevada y superficies con texturas con menor distribución de picos.

Todos los parámetros espaciales se determinan sobre el área definida para el análisis.

La función de autocorrelación (AutoCorrelation Function - ACF).- evalúa la correlación existente en una parte de una imagen con respecto a toda la imagen. El ACF se define como un giro de la superficie con sí misma, desplazado por (τ_x, τ_y) .

$$ACF(\tau_x, \tau_y) = \frac{\iint z(x,y)z(x-\tau_x, y-\tau_y) dx dy}{\iint z(x,y)^2 dx dy} \quad (6)$$

El ACF produce un valor entre -1 y +1 por cada punto de la superficie. Un ACF de +1 significa una correlación perfecta, y cero significa que no hay correlación.

El valor máximo de ACF es siempre en el centro. La figura 16 muestra un ejemplo de textura superficial y su gráfico de autocorrelación.

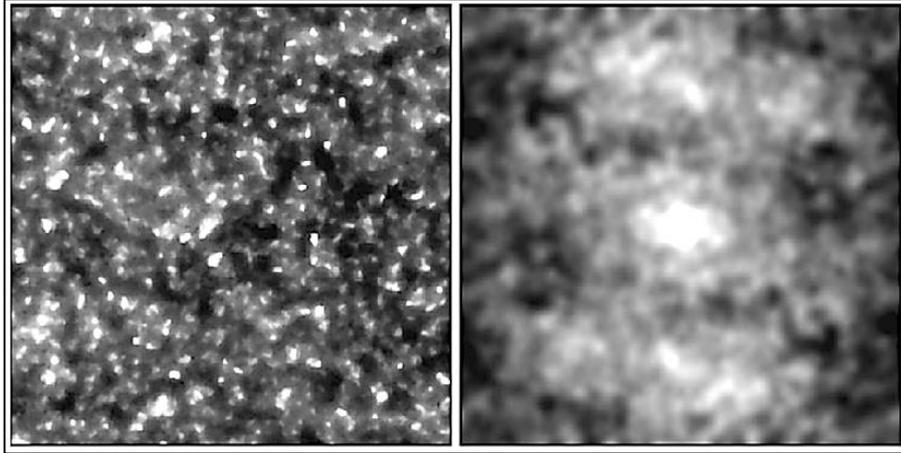


Figura 16: Parámetros ACF.

Fuente: Leach, R. Characterisation of Areal Surface Texture, pp. 32

ACF se utiliza para estudiar la periodicidad en una superficie, es decir, cuando una forma en la textura se reproduce varias veces, o se utiliza para evaluar la isotropía de una superficie.

Longitud de autocorrelación S_{al} .- se define como la distancia horizontal de la ACF (t_x, t_y) que tiene la desintegración más rápida de un valor especificado S , con $0 \leq s < 1$. Para superficies relativamente lisas, el valor de s se puede tomar como 0,2 (ISO 25178:2012 parte 3).

$$S_{al} = \min_{t_x, t_y \in R} \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \quad (7)$$

Donde

$$R = \{(t_x, t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \leq S\} \quad (8)$$

Un valor alto de S_{al} denota que esa superficie está dominada por componentes de frecuencia espacial baja (longitudes de onda largas), mientras que un valor bajo para S_{al} denota el caso opuesto.

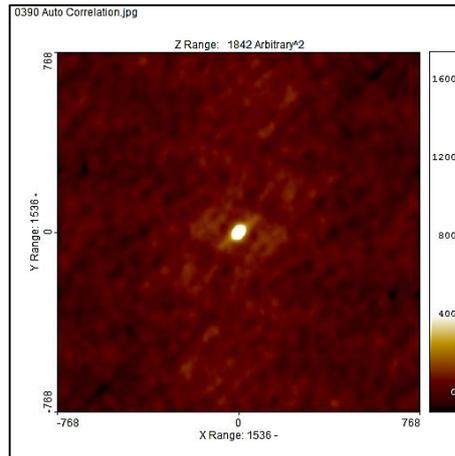


Figura 17: Gráfica de longitud de autocorrelación (Sal) para mezclas asfálticas drenantes.
Fuente: Esparza, S.

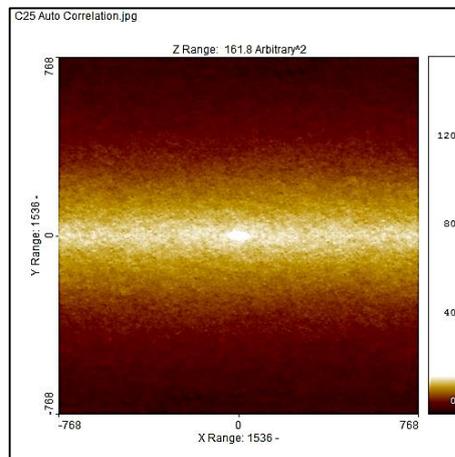


Figura 18: Gráfica de longitud de autocorrelación (Sal) para mezclas asfálticas densas.
Fuente: Esparza, S.

La relación de aspecto de la textura, Str .- este es uno de los parámetros más importantes cuando se realiza la caracterización de un área a un nivel superficial, ya que caracteriza a la isotropía de la superficie.

El parámetro S_{al} se calcula a partir del radio mínimo en el lóbulo central de la ACF. Mientras que el parámetro Str se calcula a partir del radio mínimo (r_{min}) y el radio máximo ($r_{m\acute{a}x}$).

$$Str = \frac{r_{min}}{r_{m\acute{a}x}} \quad (9)$$

El parámetro Str es una evaluación de la isotropía de la textura superficial. Si Str es cercano a la unidad o por lo menos >0.5 , entonces la superficie es isotrópica, es decir, tiene las mismas propiedades independientemente de la dirección. En una superficie isotrópica, es posible evaluar la textura superficial usando un perfil. Si Str es cercano a 0 o <0.3 , entonces

la superficie es anisotrópica, es decir, tiene una dirección de textura dominante. En este caso, el parámetro Std dará el ángulo de dirección de la textura.

La dirección de la textura superficial Std.- es el parámetro utilizado para determinar la dirección más pronunciada de la textura superficial con respecto al eje y, dentro del dominio de la frecuencia, es decir, da la dirección de colocación de la superficie. Éste parámetro se evalúa a partir del espectro de Fourier obtenido de la superficie. El espectro de Fourier da el contenido de energía de cada frecuencia espacial en la superficie y por lo general se representa como un gráfico donde las amplitudes están codificadas con un color o un nivel de gris o color, Figura 19.

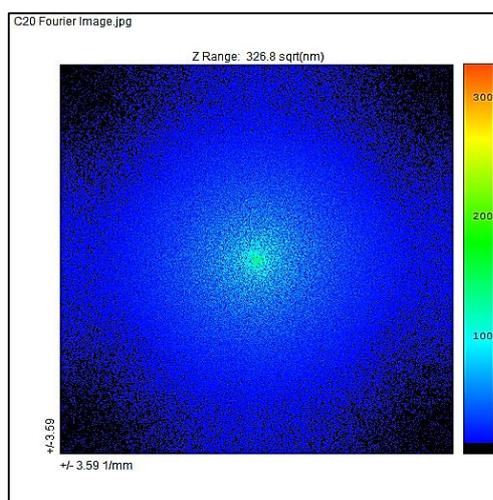


Figura 19: Espectro de Fourier utilizando el software SPIP™.
Fuente: Esparza, S.

El parámetro estándar se da en grados entre 0° y 180° , y debe considerarse como insignificantes si el factor de isotropía Str. está por debajo de 0,6 y 0,8. La definición del estándar de ISO 25178 parte 2 específica que el ángulo se puede dar desde un ángulo de referencia s. Por esta definición, cuando la dirección de seguimiento es perpendicular a la disposición de la dirección de textura el ángulo es 0° . El parámetro estándar es un parámetro conveniente en superficies que muestran arañazos y textura orientada. (McGarigal, Tagil, & Cushman, 2009).

2.5.1.3 Parámetros híbridos.

Los parámetros híbridos están basados en la amplitud y en la información espacial. Se definen propiedades numéricamente híbridas de topografía, tales como la pendiente de la superficie, la curvatura de los puntos altos, (Blunt & Jiang, 2003). Este tipo de parámetro es

útil, sobre todo en el desgaste por fricción y en el comportamiento óptico, (Whitehouse, Handbook of surface and nanometrology, 2011).

Pendiente de la media cuadrática, (Root Mean Square Gradient), Sdq.- es la raíz cuadrada media de la gradiente de la superficie, dentro de un área definida (A), con una escala limitada. La gradiente de la raíz cuadrada media se calcula entonces con:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (10)$$

Blateyron, F. (2013), expresa la siguiente ecuación para el cálculo de Sdq:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint \left(\frac{\partial z^2}{\partial x} + \frac{\partial z^2}{\partial y} \right) dx dy} \quad (11)$$

Donde A es el área proyectada de la superficie. El parámetro Sdq tiene un valor positivo, carente de unidades. Opcionalmente, se puede expresar en ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$) o ($\mu\text{m}/\text{mm}$), o incluso como un ángulo mediante el cálculo de la arcotangente de la ecuación anterior.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{\partial z^2}{\partial x} + \frac{\partial z^2}{\partial y}} \right) \quad (12)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial z^2}{\partial y}}{\frac{\partial z^2}{\partial x}} \right) \quad (13)$$

El ángulo α caracteriza el gradiente más pronunciado en el plano vertical, y se da como un ángulo entre 0° y 90° , siendo horizontal a 0° y vertical a 90° . El ángulo β , caracteriza la orientación media de los objetos de la superficie y es una evaluación de la dirección de la textura. Se da como un ángulo entre 0° y 360° , con 0° en la dirección del eje x, en sentido anti horario. Figura 20.

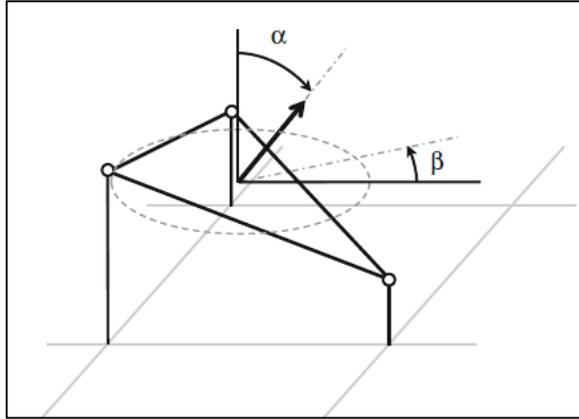


Figura 20: Orientación del ángulo β , e inclinación del ángulo α de un aspecto de la superficie.
Fuente: Leach, R. Characterisation of Areal Surface Texture, pp. 30

Desarrollo de la relación de área interfacial de la superficie en una escala limitada Sdr.- este parámetro se calcula sumando las áreas locales cuando se sigue la curvatura de la superficie.

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right] \quad (14)$$

El parámetro Sdr puede ser dado como un número positivo sin unidades o como un porcentaje. Por lo general tendrá un valor de varios tantos por ciento (típicamente entre 0 y 10%). Una superficie perfectamente plana y lisa tendría Sdr = 0%. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

2.5.1.4 Funciones y parámetros relacionados.

Las definiciones de los parámetros y funciones relacionadas se presentan en los siguientes:

Distribución de la altura y curva de relación de los Materiales.- la distribución de la altura puede ser representada como un histograma de las alturas de la superficie; que cuantifica el número de puntos en la superficie que se encuentran, a una altura dada. La curva de relación de los materiales es la curva acumulada de la distribución. La curva de distribución del material agrupa desde el punto más alto de la superficie de estudio (donde la curva inicia con un valor de 0% de material) a su punto más bajo (donde la curva acumulada alcanza el 100% del material) figura 21, (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

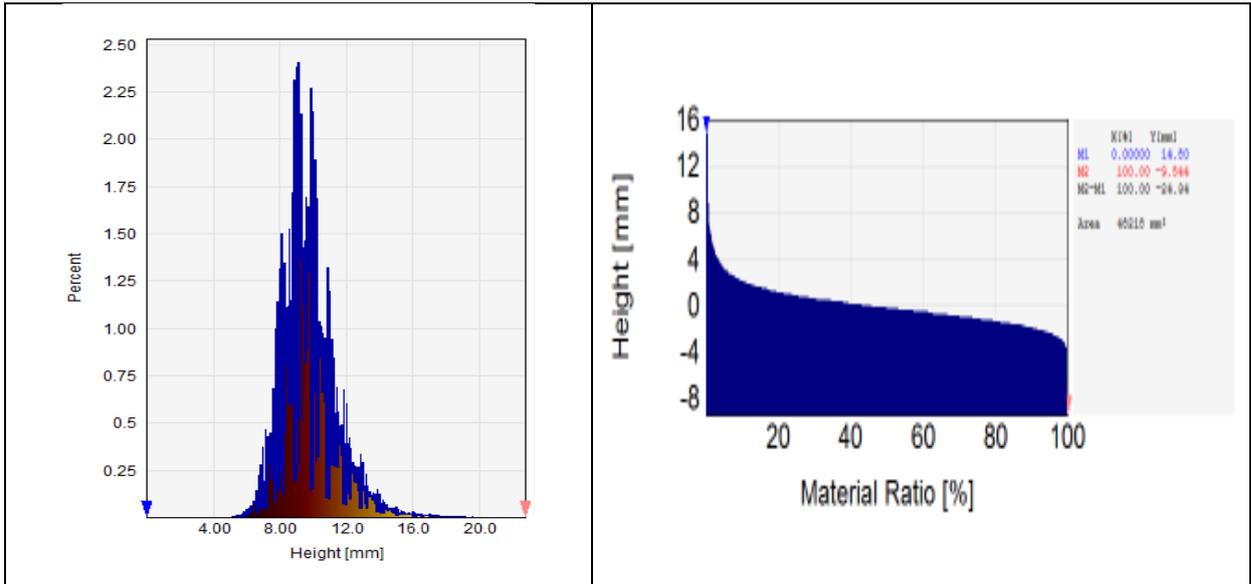


Figura 21: Histograma y curva acumulada.
Fuente: Esparza, S.

Los parámetros de la relación de materiales, son los siguientes

Relación de área de los Materiales, SMR.- es la relación existente entre el material a una altura especificada C de la zona de evaluación expresada como un porcentaje (véase la figura anterior). La función SMR (c) da la relación de material P correspondiente a una altura de corte C dada como un parámetro.

Inverso de la relación de área de los Materiales, Smc.- La función Smc (p) evalúa el valor de altura C corresponde a un porcentaje de material P dada como parámetro.

Altura máxima de picos, SxP.- parámetro que está dirigido a la caracterización de la parte superior de la superficie, desde el plano medio hasta el pico más alto sin tener en cuenta un pequeño porcentaje de los picos más altos que pueden no ser significativos,

$$Sxp = Smc(2.5\%) - Smc(50\%) \quad (15)$$

Los valores de 2.5 y de 50% se definen como los valores por defecto (ISO 25178-3 2011) y se pueden establecer otros valores dependiendo de la aplicación (valores que deben estar cerca de estos ya que este parámetro se define específicamente para la caracterización de pico).

Diferencia de sección en la superficie, S_{dc} .- El parámetro S_{dc} puede ser usado para dar la altura máxima de la superficie cuando se eliminan los picos y los valles extremos o se aplica un umbral.

$$S_{dc} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q) \quad (16)$$

Donde p y q son dos relaciones de materiales que se pueden elegir libremente en función de la aplicación, por ejemplo, con $p = 2\%$ y $q = 98\%$; se eliminan los picos y valles extremos.

Altura central S_k .- es la distancia entre el nivel más alto y el más bajo de la superficie central establecida por S_{mr1} y S_{mr2} .

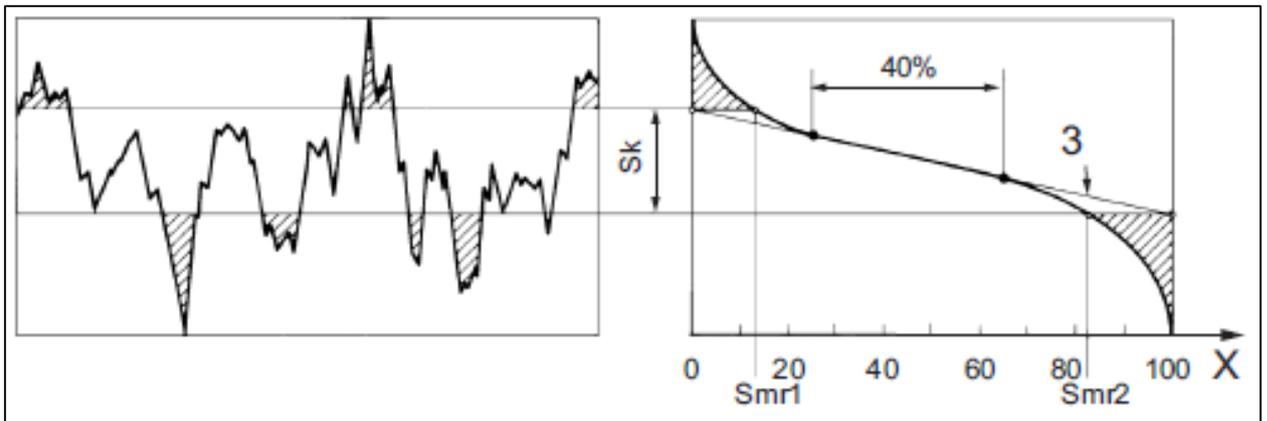


Figura 22: Cálculo de S_k
Fuente: Norma ISO 25178:2012 parte 2.

Altura reducida del pico, S_{pk} .- es la altura promedio de los picos que sobresalen por encima de la superficie central, es decir, sobre S_{mr1} .

Altura reducida del valle, S_{vk} .- es la altura promedio de los valles que sobresalen por debajo de la superficie central, es decir, bajo S_{mr2} .

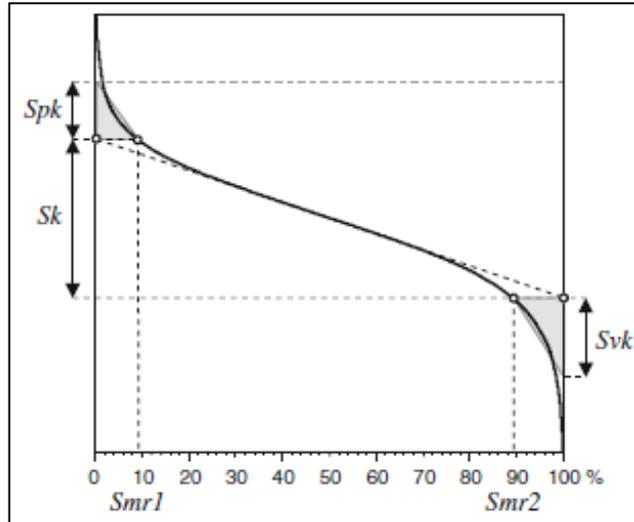


Figura 23: Ubicación de Sk, Spk, Svk, Smr1 y Smr2.

Fuente: Leach, Richard. Characterisation of Areal Surface Texture, pp. 25.

Desviación de la raíz cuadrada media en los valles, Svq.- pendiente de una regresión lineal realizado en la región de valles (Svk).

Desviación de la raíz cuadrada media en la región central, Spq.- pendiente de una regresión lineal realizado en la región central (Sk).

Proporción de materiales Smq.- es la proporción de materiales existentes en la intersección de la parte central con la parte de los valles, esta relación se expresa en porcentaje.

Así mismo a continuación se describen los parámetros de volumen

Volumen de Vacío, Vv.- es el volumen de huecos, que indica el volumen de vacío calculado para una relación mr de material. Este parámetro se calcula integrando el volumen encerrado por encima de la superficie y por debajo de un plano de corte horizontal fijado a una altura $h = S_{mc}(MR)$. Esto se puede expresar por la siguiente formula:

$$V_v(mr) = \frac{k}{100\%} \int_{mr}^{100\%} [S_{mc}(mr) - S_{mc}(q)] dq \quad (17)$$

donde k es un factor para convertir el volumen a la unidad requerida, ya sea $[\mu\text{m}^3]$, $[\mu\text{m}^3/\text{mm}^2]$ o $[\text{ml}/\text{m}^2]$. El volumen de vacío se puede representar en la curva de Abbott-Firestone como se muestra en la figura 24.

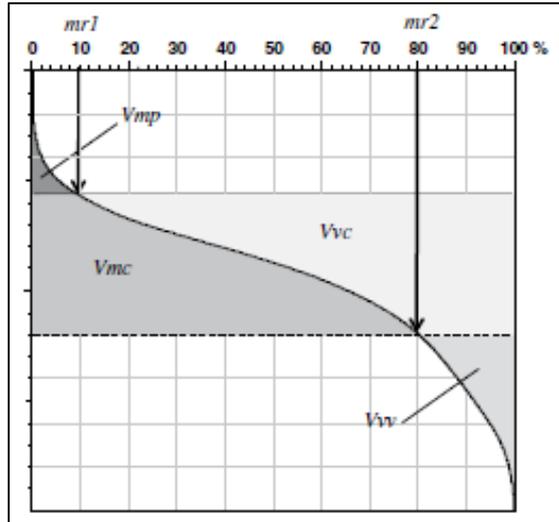


Figura 24: representación de parámetros de volumen en la curva de Abbott-Firestone.
Fuente: Leach, Richard. Characterisation of Areal Surface Texture, pp. 29

$$V_{vv} = V_v (mr_{80\%})$$

Para $mr = 100\%$, el volumen vacío es cero. Para $mr = 0\%$, el volumen de huecos es el valor máximo. Los cálculos de volumen de huecos a menudo son útiles para evaluar la textura de la superficie de componentes mecánicos que son utilizados en contacto con otras superficies. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013)

Volumen de material, V_m .- es el volumen de material calculadas para una relación de material mr . El parámetro se calcula integrando el volumen encerrado debajo de la superficie y por encima de un plano de corte horizontal fijado a una altura $h = S_{dc} (MR)$. Este parámetro se puede expresar por la siguiente:

$$V_m(mr) = \frac{k}{100\%} \int_{0\%}^{mr} [S_{mc}(q) - S_{mc}(mr)] dq \quad (18)$$

El volumen del material se puede representar en la curva de Abbott-Firestone como se muestra en la figura 24.

Para $mr = 100\%$, el volumen de huecos es el máximo. Para $mr = 0\%$, el volumen vacío es cero.

Volumen de material de los picos, V_{mp} .- es el volumen de material calculado en un porcentaje de material mr fijo,

$$V_{mp} = V_m(mr1) \quad (19)$$

donde $mr1 = 10\%$ por defecto. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

Volumen del material del centro, V_{mc} .- es la diferencia entre dos valores de volumen de materiales calculados a diferentes alturas:

$$V_{mc} = V_m(mr2) - V_m(mr1) \quad (20)$$

donde $mr2 = 80\%$ y $mr1 = 10\%$ por defecto. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

Volumen de Vacíos en el centro, V_{vc} .- es la diferencia en el volumen vacío entre el MR1 y MR2, y está dada por:

$$V_{vc} = V_v(mr1) - V_v(mr2) \quad (21)$$

donde $mr2 = 80\%$ y $mr1 = 10\%$ por defecto. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

2.5.1 Parámetros característicos del área.

A diferencia de los parámetros de campo, donde se toma cada punto de la superficie en cuenta en el cálculo, los parámetros de área sólo tiene en cuenta las características identificadas en la superficie. Estas características se consideran, ya que juegan un papel importante en una función en particular, por ejemplo, las grandes cumbres o picos y colinas se establecen como zonas de contacto de esta superficie frente a otra, mientras que los puntos situados en los valles no tienen ningún tipo de contacto, frente a otra superficie. Las características más significativas se identifican por la segmentación de la superficie y seleccionadas por un método de discriminación conocida como la poda (Wolf Pruning).

Los conceptos clave que se utilizan para describir los parámetros de área, basadas en la segmentación de las cuencas hidrográficas (Watershed), ver 2.5.1.1, de la superficie son: curvas de nivel, picos, hoyos, valles, colinas, línea de curso, línea de borde y punto de silla, que se describen a continuación.

Curvas de nivel.- representan las alturas medidas desde una superficie de referencia. Por convención, la superficie de referencia está representada por un plano horizontal que define el nivel cero. Las curvas de nivel son una manera conveniente para representar las líneas de igual altura en un mapa en blanco y negro de una superficie topográfica. Estas curvas se

utilizan para definir los puntos críticos y otros conceptos. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

Colinas.- es toda el área circundante a un pico. Desde cualquier punto de una colina hay un camino ascendente que termina en un pico único. Si el camino hacia arriba desde un punto termina en otro pico, entonces este punto pertenece a otra colina. Todos los puntos que pertenecen a una colina están rodeados por una línea de curso.

Valle.- Un punto de la superficie que es más baja que sus alrededores se llama un pozo. El área alrededor se llama valle. Desde cualquier punto de un valle hay un camino descendente que termina en un pozo único y el valle define una cuenca: una gota de agua a partir de cualquier punto de la cuenca se extienden hasta el pozo. Si el camino hacia abajo desde un punto termina en otro pozo, esto significa que este punto pertenece a otro valle. Todos los puntos que pertenecen a un valle están encerrados por una línea de borde. (Blateyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

Líneas de curso.- estas incluyen líneas que representan el flujo descendente de agua que caen a un lado de una colina. El agua fluye hacia abajo hasta el punto mínimo, el pozo.

Saddle Points (Puntos de silla de montar)- los puntos de silla están en el punto de intersección de las líneas de borde y las líneas de curso. Como se muestra en la figura 25.

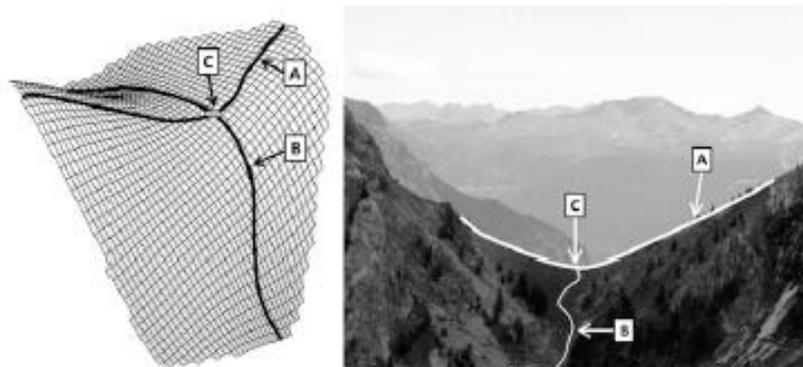


Figura 25: Representación de los Saddle points. A: Línea de borde; B: Línea de curso; C: Saddle point.

Fuente: Leach, Richard. Characterization of Areal Surface Texture, pp. 49

Hay varios puntos de silla alrededor de un valle o alrededor de un borde. La silla de montar más bajo de un valle tiene un significado especial, corresponde al punto donde el agua fluye hacia un valle adyacente. Esta propiedad crea una conectividad especial con el valle adyacente, que en sí mismo puede tener otro valle adyacente donde fluirá el agua, y así

sucesivamente hacia los puntos más bajos de la superficie. (Blatyron, The Areal Feature Parameters, 2013).

2.5.1.1 Segmentación de Cuencas (Watershed).

El proceso de segmentación de cuencas se inicia desde el punto más bajo de la superficie. Se derrama agua virtual sobre toda la superficie desde arriba, de manera que los valles alrededor del punto donde cae el agua, se inunda progresivamente. En cualquier momento durante el proceso de verter el agua ocupa un área rodeada por una curva de nivel. A medida que el nivel del agua aumenta se mueve hacia arriba a las curvas de nivel superiores. Del mismo modo, valles de toda la superficie se inundan cuando sus curvas de nivel están por debajo del nivel de inundación.

Cuando dos valles adyacentes se inundan a un nivel en el que sus curvas de nivel se ponen en contacto, una pared virtual se registra en los puntos de contacto. Las paredes virtuales que se registran de esta manera son las líneas de borde que rodean los valles. Cuando el nivel de la inundación alcanza el punto más alto en la superficie, la segmentación de cuencas se completa y todos los valles se segmentan por líneas de borde.

La segmentación de cuencas puede llevar a miles de valles pequeños e insignificantes, esto se conoce como sobre-segmentación. En este caso, se requiere un paso adicional con el fin de fusionar los valles pequeños en los más grandes este método se conoce como “la poda”, (Wolf Prunning, ver 2.5.1.2).

2.5.1.2 Árbol de cambio y poda de Wolf.

Los picos, los “Saddle points” o sillas de montar y los pozos, son puntos críticos conectados por líneas de borde y líneas del curso. Las conexiones entre ellos se pueden representar en la figura 26.

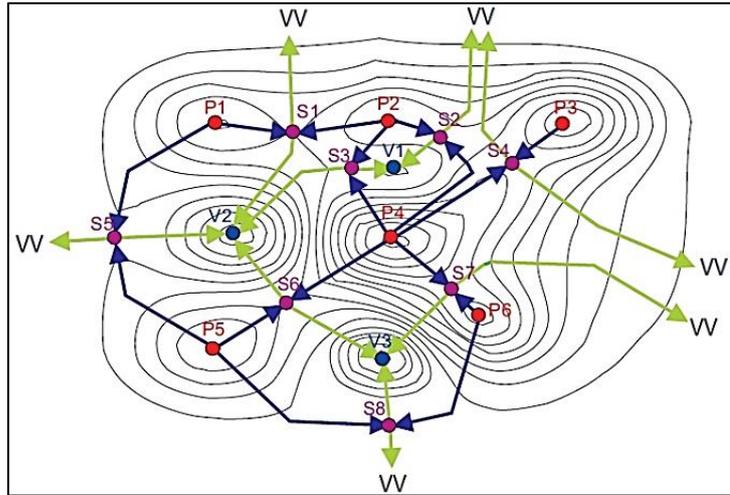


Figura 26: Conexiones entre puntos críticos.

Fuente: ISO 25178:2012 Parte 2. Geometrical product specifications (GPS), Surface texture: Areal. PP. 32.

Dónde:

- P: Picos
- V: Pozos
- S: Saddle points
- VV: Pozos virtuales.

Mediante la Figura anterior se puede obtener una gráfica de árbol de cambio en la que se representan las alturas entre los picos, pozos, saddle points, y su interacción.

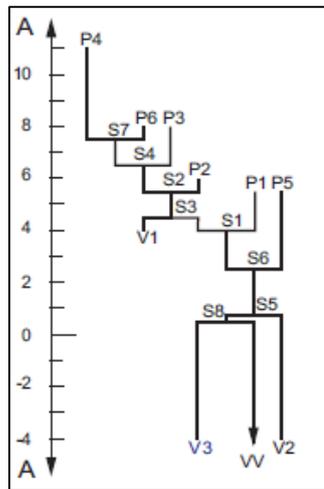


Figura 27: Árbol de cambio.

Fuente: ISO 25178:2012 Parte 2. Geometrical product specifications (GPS), Surface texture: Areal. PP. 33.

ISO 25178:2012 refiere q el método de poda de Wolf consiste en encontrar el pico o pozo con la diferencia de altura más pequeña y la combina con el punto de silla adyacente en el árbol de cambio. El otro pico o pozo también conectado a este punto de silla ya está conectada a otra silla y por lo que su diferencia de altura se ajusta para reflejar esto. El

proceso se repite entonces con ese pico o pozo con la diferencia de altura más pequeña a su punto de silla adyacente en el árbol de cambio se elimina hasta que se alcanza algún umbral. Este umbral podría ser cuando todas las diferencias de altura restantes están por encima de un valor fijo o variante y un número fijo de picos o pozos se quedan en el árbol. La poda de estos conductores para el árbol de cambio dado en la figura anterior es.

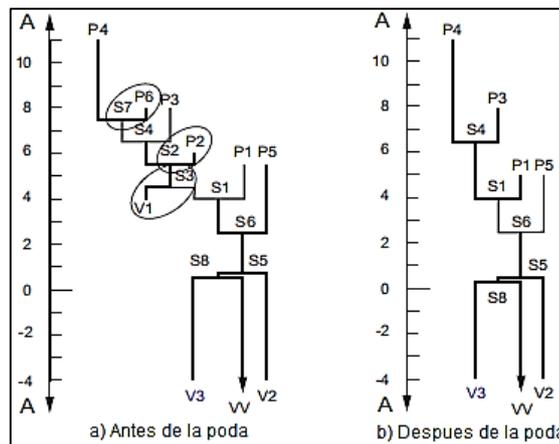


Figura 28: Árbol de cambio, antes y después de la poda de Wolf.

Fuente: ISO 25178:2012 Parte 2. Geometrical product specifications (GPS), Surface texture: Areal. pp. 35.

Usando este método hasta cinco picos y cinco pozos se quedan en una superficie. Estos picos y pozos pueden no ser los más altos o los más bajos, pero van a ser los más elevados.

2.5.1.3 Parámetros de presentación.

Densidad de picos, Spd.- La densidad de pico se calcula dividiendo el número de picos por la unidad de área. Se expresa en unidades de $1/\text{mm}^2$ o picos/ mm^2 . En este parámetro se tiene en cuenta sólo los picos significativos, debido a la segmentación de las cuencas hidrográficas (watershed) y la poda de Wolf.

El parámetro Spd puede ser usado en aplicaciones donde el contacto con otra superficie está implicado, por lo general en la combinación con otros parámetros tales como los parámetros de altura máxima (Sp) o mínima (Sv); véase 2.5.1.1.

Curva de picos, Spc.- El parámetro Spc es la curva de la media aritmética de los picos significativos. Las unidades de este parámetro se dan en $1/\text{mm}$ de forma predeterminada. Al igual que con Spd, sólo los picos significativos se toman en cuenta para Spc.

La curvatura es el inverso del radio de curvatura, es decir, un valor mayor de S_{pc} significa un pequeño radio de curvatura. En este caso, el pico es afilado y es probable que se desgaste durante un contacto deslizante o se deforme plásticamente durante un contacto estático con otra superficie. Un valor pequeño de S_{pc} significa un gran radio de curvatura, en este caso, el pico es amplio, lo que denotaría buenas propiedades de contacto y puede estar sujeto a deformación elástica en caso de contacto estático.

Alturas significativas.- La definición de picos significativos y pozos significativos en base a la poda, se puede utilizar para establecer parámetros sólidos que estiman la altura de la textura superficial: S_{5p} , S_{5v} y S_{10z} , definidos de la siguiente manera.

S_{5p} es la media aritmética de la altura de los cinco picos más altos significativos.

S_{5v} es la media aritmética de la altura de los cinco pozos más importantes. Tenga en cuenta que la altura es siempre positiva y la altura de un pozo es de hecho su profundidad.

S_{10z} es simplemente la suma de S_{5p} y S_{5v} :

$$S_{10z} = S_{5p} + S_{5v} \quad (22)$$

Estos parámetros se dan en μm o en la unidad del eje z utilizados en la representación de la superficie.

Área y Volumen.- el área del valle, S_{da} , y el área de la colina, S_{ha} , se calculan como el promedio del área de todos los “motifs” individuales. El área considerada aquí es el área horizontal del “motif” proyectado sobre el plano horizontal. Los parámetros S_{da} y S_{ha} se dan en milímetros cuadrados.

Los “motifs”, se los puede entender como el área inundada de un valle hasta el “saddle point” del mismo valle. Figura 29.

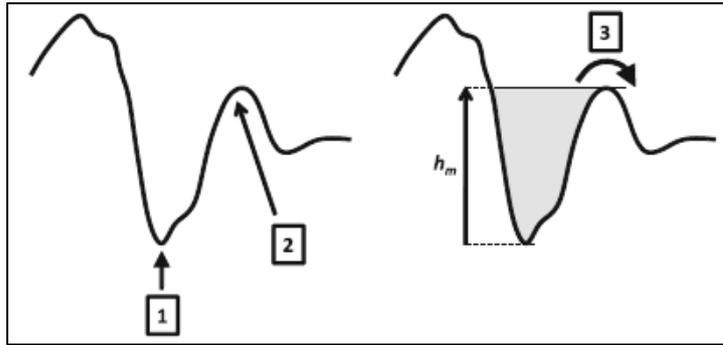


Figura 29: Representación de los “Motifs”.

Fuente: Leach, Richard. Characterization of Areal Surface Texture, pp. 49

Dónde:

- 1: Pozos
- 2: Saddle points
- 3: Inundación al próximo valle.
- Hm: Altura del Motif.

El volumen del valle, S_{dv} , y el volumen de las colinas, S_{hv} , se calculan como la media de todos los motifs individuales. El volumen está delimitada horizontalmente por su línea de borde, y delimitada verticalmente a lo largo del eje z de la superficie por un lado y por un plano horizontal situado en su nivel más alto el “saddle point” o punto de silla en el otro. Los parámetros S_{dv} y S_{hv} se dan en unidades de volumen (mm^3).

Parámetros de área y de volumen se calculan generalmente en “motifs” cerrados, es decir, sobre los “motifs” que no se cortan por el borde del área de evaluación.

La dificultad del método de evaluación de MOTIF’s es la identificación y extracción de una sola MOTIF. La imagen en escala de grises de la superficie medida por el método de segmentación de cuencas se compone de un número de pequeñas regiones segmentadas. Cada región es una unidad básica e incluye las coordenadas de la imagen de todos los píxeles. Reunir estas unidades es posible mediante algoritmos, (Shenghuai, Fenghua, Yurong, & Tiebang, 2011)

En el procesamiento de imágenes, diferentes tipos de líneas de cuencas se pueden calcular, líneas de cuencas se pueden definir en los “motifs”, en los bordes o líneas híbridas de ambos “motifs” y los bordes. Las cuencas también pueden definirse en el dominio continuo. También hay algoritmos diferentes para calcular la segmentación de cuencas. (Vincent & Soille, 1991) Algoritmo de cuencas se utiliza en el procesamiento de imágenes, principalmente con fines de segmentación.

CAPÍTULO III

3. Metodología.

3.1 Losetas de mezcla asfáltica drenante.

3.1.1 Elaboración de losetas.

Debido a las características propias de las mezclas drenantes, (Ayala & Juárez, 2010), indican que la necesidad de desarrollar ensayos que ayuden a comprender de una mejor forma su comportamiento y evaluación es evidente, ya que, debido a la particularidad de su estructura interna supone que la energía de compactación necesaria para lograr la compacidad en obra es menor que en las mezclas convencionales, por lo tanto se realiza 50 compactaciones, para alcanzar la máxima densidad en la metodología Marshall, no obstante, se debe tener presente que para el caso de las mezclas drenantes las propiedades requeridas nada tienen que ver con su estabilidad, son otras propiedades y características las que importan siempre y cuando se adapten a los fines buscados y tomando en cuenta las solicitaciones a las que la mezcla estará sometida.

Algunas de las metodologías normalmente utilizadas son:

METODO DEL CANTABRO (Origen ESPAÑA)

El método parte del estudio de la cohesión en la mezcla, la cual se realiza en base a exigencias de estudios a sus agregados y asfaltos disponibles. Se fabrican numerosos especímenes para analizarlos en laboratorio, determinando la pérdida por desgaste de una probeta de mezcla empleando la máquina de Los Ángeles sin la carga de bolas de acero.

AUSTRALIANA (Open Graded Asphalt Design Guide, originada en la Australian Asphalt Pavement Association). - Se basa en una "Guía de Diseño" la cual hace la composición de ensayos y determinaciones características, mediante "Cartas de Diseño", preestablecidas. Con esto es posible establecer qué porcentaje de asfalto es el necesario en el diseño de la mezcla de obra, respetando valores de ensayos tales como:

Cántabro Seco, Cántabro Húmedo, Vacíos, Escurrimiento.

Esta guía de diseño sugiere dos rangos de aplicación, denominados como:

- Tipo I, TMDA (Tránsito Medio Diario Anual) < 500 ($N < 5 \times 10^6$)
- Tipo II, TMDA (Tránsito Medio Diario Anual) > 500 ($N > 5 \times 10^6$).

En esta investigación, la metodología cántabro (método UCL) es la que se utiliza, para su desarrollo. Que por sus ensayos y metodología utilizada es la óptima para el desarrollo en laboratorio. La mezcla bituminosa porosa empleada para los ensayos que se realizaron fue una mezcla en caliente tipo PA-10. Con un tamaño máximo nominal de 9.5mm. Se realizó el diseño de la mezcla con las características de los áridos expresados en el capítulo anterior.

Para la caracterización de los asfaltos, ésta se realizó de acuerdo a las especificaciones establecidas. Para determinar las temperaturas de mezcla y de compactación, se utilizó el nomograma de Heukelom, que utiliza los resultados de penetración y temperatura de reblandecimiento, se siguió el procedimiento y los resultados se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del monograma de Heukelom.

| CARACTERÍSTICAS | ASFALTO |
|------------------------------------|----------------|
| Penetración (100 gr, 25°C, 5 seg.) | 75 |
| Punto reblandecimiento (°C) | 48 |
| Ductilidad (cm) a 25°C | 136.3 |
| Viscosidad (cSt) a 135°C | 352 |
| Punto de inflamación °C | 298 |
| Índice de penetración | 0.52 |
| Temperatura (T800) | 48.5 |
| Temperatura de Mezcla °C | 157 |
| Temperatura de Compactación °C | 145 |

Fuente: Esparza, S.

Con los resultados de la caracterización de los áridos se procede a seguir un diseño tipo Marshall que para el mezclado, dentro de este procedimiento el asfalto se calienta a una temperatura correspondiente a una viscosidad de 2,8 poises y el agregado a una temperatura de 20°C más que la del asfalto, según la norma ASTM D-1559. (STANDARD SPECIFICATIONS, 2004), se elabora 5 Briquetas por cada porcentaje de asfalto, con una compactación de 50 golpes por cara, con un martillo que cumpla las

especificaciones, estas briquetas se las elabora para realizar la metodología del cántabro en la que se necesitan los siguientes ensayos:

- Densidad Bulk
- Porcentaje de Vacíos, y
- Ensayo de cántabro seco.



Figura 30: Elaboración de Briquetas.
Fuente: Esparza, S.

Las briquetas se elaboraron con diferentes porcentajes de asfalto, así se inició desde el 3% hasta el 6% con intervalos del 0.5% obteniéndose los resultados expresados en las siguiente tabla.

Tabla 7. Resultados de Densidad Bulk y porcentaje de vacíos.

| % Ligante | Densidad Bulk Promedio | Densidad RICE | % VACÍOS PROMEDIO |
|------------------|-------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 3 | 1.679 | 2.550 | 34.00% |
| 3.5 | 1.724 | 2.523 | 32.00% |
| 4 | 1.735 | 2.494 | 30.00% |
| 4.5 | 1.764 | 2.473 | 29.00% |
| 5 | 1.771 | 2.379 | 26.00% |
| 5.5 | 1.819 | 2.380 | 24.00% |
| 6 | 1.816 | 2.381 | 24.00% |

Fuente: Esparza, S.



Figura 31: Ensayo Densidad Rice para obtener la densidad Bulk.
Fuente: Esparza, S.

Para el ensayo de Cántabro se utiliza el método descrito por (Miró Recasens J. R., Metodología para la Caracterización de Ligantes Asfálticos Mediante el Empleo del Ensayo Cantabro, 1994), en la cual cada una de las briquetas se mantienen a una temperatura constante de 25°C por el lapso de 6 horas luego de esto se las somete a 300 revoluciones en el interior de la máquina de los ángeles sin bolas de acero, el desgaste en peso producido por este método con respecto al peso inicial nos da un porcentaje el cual es el valor del ensayo de cántabro, Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de desgaste al Ensayo de Cántabro seco.

| % ASFALTO | PORCENTAJE DE DESGASTE | DESVIACIÓN ESTÁNDAR |
|-----------|------------------------|---------------------|
| 3 | 94.47% | 0.0031 |
| 3.5 | 67.91% | 0.0006 |
| 4 | 49.82% | 0.0014 |
| 4.5 | 18.67% | 0.0009 |
| 5 | 15.09% | 0.0045 |
| 5.5 | 9.10% | 0.0011 |
| 6 | 7.41% | 0.0016 |

Fuente: Esparza, S.



Figura 32: Briqueta luego de someterla al ensayo de cántabro.
Fuente: Esparza, S.

Posterior al ensayo de todas las briquetas, se realizó el procedimiento para determinar el porcentaje óptimo de ligante asfáltico, considerando los siguientes ítems:

- El primer valor a considerar es el que corresponde a la máxima Gravedad Específica Bulk alcanzada, considerando la figura 33, la que refleja que para la presente investigación el resultado es de 5.8% de asfalto.

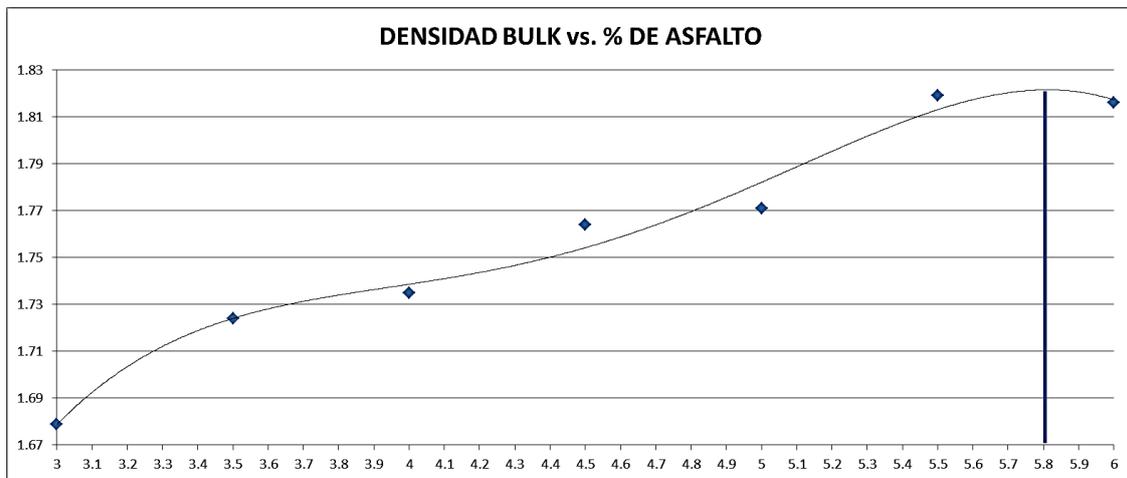


Figura 33: Densidad Bulk vs. Porcentaje de asfalto.
Fuente: Esparza, S.

- El siguiente valor a considerar es el resultado de la Figura de porcentaje de vacíos vs. porcentaje de asfalto, valor que tiene que estar en el rango de 20 a 25% de Vacíos, para este caso es de 5.3% de asfalto

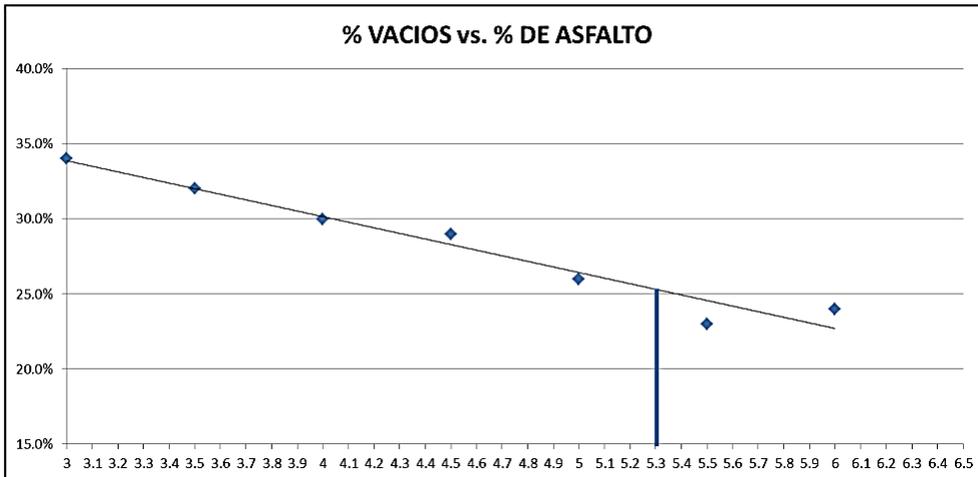


Figura 34: Porcentaje de vacíos vs. Porcentaje de asfalto.
Fuente: Esparza, S.

- El último valor que integrará parte para obtener el porcentaje óptimo de asfalto es el que corresponda en la Figura de porcentaje de desgaste vs. porcentaje de asfalto, valor que se tomara el que se encuentre en el intervalo de menor o igual al 25% de desgastes, en los ensayos realizados se obtuvo un valor de 4.5% de asfalto.

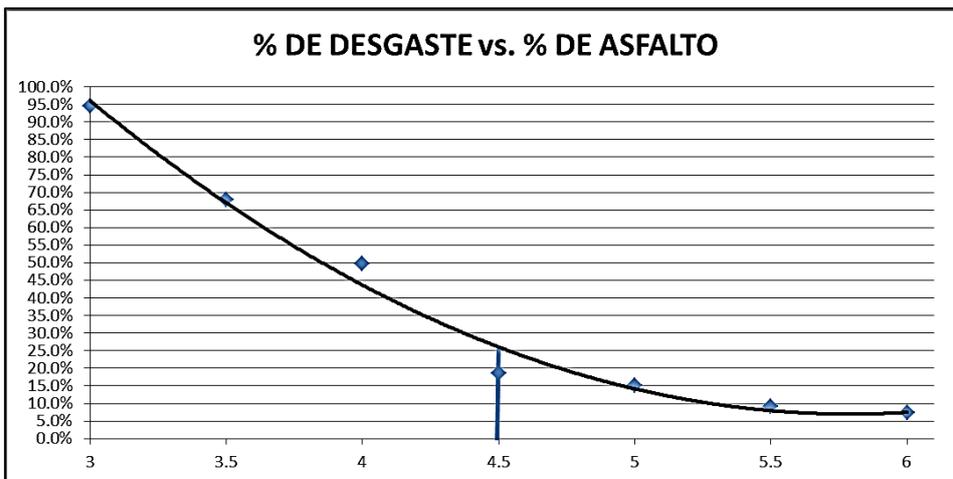


Figura 35: Porcentaje de desgaste vs. Porcentaje de asfalto.
Fuente: Esparza, S.

Con la obtención de estos tres valores, el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla es el valor promedio de ellos, el cual para esta investigación es de 5.2% de Asfalto.

En lo que respecta a la elaboración de probetas experimentales para el desarrollo de esta investigación se pone en marcha la fabricación de tres losetas del conglomerado asfalto-agregado, adicionándole 0%, 1%, 2% y 3% del polímero SBS, (3 por cada porcentaje de polímero) para poder observar así mismo la influencia del polímero en la textura superficial.

Se continua con la elaboración de estas losetas de la siguiente manera: 1. Calentar los áridos aproximadamente a una temperatura de 177 °C ASTM D-1559. (STANDARD SPECIFICATIONS, 2004), en una estufa, utilizando las medidas necesarias para elaborar la losetas cuadradas de 500 mm por lado y 65mm de espesor, (Rodríguez Hernández, 2008), se utilizó 14 kg de la mezcla (94.8% árido y 5.2% material ligante), por cada loseta. 2. Calentar el ligante asfáltico a la temperatura obtenida del monograma de Heukelom, la cual es de 157°C para proceder a la mezcla con los áridos. 3. Mezcla de áridos y ligante asfáltico manteniendo la temperatura constante a 157°C, mezcla que deberá ser homogénea y prestando especial atención que no queden caras de los áridos sin contener ligante asfáltico. En un movimiento rápido verter la mezcla en el molde metálico fabricado para este fin. 4. Una vez vertida la mezcla en el molde se procede a realizar la compactación de la loseta para lo cual se elaboró un rodillo de 600mm de longitud por 300mm de diámetro con un peso aproximado de 114 kg. Con el cual se realiza 5 dobles pasadas. Prestando atención en la temperatura que no sea menor a 145°C.

Una vez elaboradas las losetas de asfalto drenante se deja secar por 12 horas aproximadamente, luego de lo cual se procede a desmoldar y ubicar en un lugar protegido del polvo.



Figura 36: Fotografías de la Elaboración de Losetas.
Fuente: Esparza, S.

3.1.2 Número de losetas a elaborar.

El número de losetas que se va elaborar se obtiene mediante un diseño experimental de un solo factor, utilizando los valores que se quieren llegar a comprobar o no, para lo cual se realiza lo siguiente:

Se inicia proponiendo las hipótesis:

H_0 : NO existen diferencias de texturas para el análisis superficial mediante el círculo de arena para los diferentes niveles del polímero.

H_A : SI existen diferencias de textura para el análisis superficial mediante el círculo de arena para los diferentes niveles del polímero.

$$H_0: t_1=t_2=t_3=t_4 \quad (23)$$

H_A : Al menos una es diferente.

Nivel de significancia: $\alpha=0.05$

Estadístico de prueba: Un F (Fisher Snedecor) a través de un ANOVA (análisis de varianza).

Regla de decisión: $F_{\text{CALCULADO}} > F_{\text{TABULADO}}$ Rechazar H_0 a un nivel de significancia $\alpha=0.05$ (ver al final).

DISEÑO DE UN EXPERIMENTO DE UN SOLO FACTOR COMPLETAMENTE ALEATORIZADO

Tabla 9. Tabla de diseño.

| Porcentaje de Polímero | Observaciones | | | | | Totales | Promedios |
|------------------------|---------------|---|---|-----|---|---------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | ... | n | | |
| 0% | | | | | | | |
| 1% | | | | | | | |
| 2% | | | | | | | |
| 3% | | | | | | | |
| SUMA: | | | | | | | |

Fuente: Esparza, S.

Mediante el uso de un software estadístico o en Excel se elaboran los diagramas de caja de bigotes para la tabla anterior, para indicar la diferencia de textura promedio superficial de las losetas experimentales.

Modelo estadístico lineal.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (24)$$

donde:

Y_{ij} : Textura superficial observada en el tratamiento i y replica j .

μ : Media global común a todo tratamiento.

τ : Parámetro asociado al nivel de polímero del i -ésimo tratamiento.

a : Número de tratamientos.

n : Número de observaciones.

ε_{ij} : Componente del error aleatorio.

Tabla 10. Tabla de diseño con los datos.

| Porcentaje de Polímero | Observaciones | | | | | Totales | Promedios |
|------------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|---------|------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | ... | n | | |
| 0% | Y11 | Y12 | Y13 | ... | Y1n | Y1• | $\bar{Y}_{1\cdot}$ |
| 1% | Y21 | Y22 | Y23 | ... | Y2n | Y2• | $\bar{Y}_{2\cdot}$ |
| 2% | Y31 | Y32 | Y33 | ... | Y1n | Y3• | $\bar{Y}_{3\cdot}$ |
| 3% | Y41 | Y42 | Y43 | ... | Y2n | Y4• | $\bar{Y}_{4\cdot}$ |
| SUMA: | | | | | | Y•• | $\bar{Y}_{\cdot\cdot}$ |

Fuente: Esparza, S.

Los errores ε_{ij} tienen una distribución normal e independiente con mediana y varianza σ^2 .

El experimento se realiza en un ambiente protegido de factores externos con características homogéneas. El número de tratamientos o niveles se tomaron de especificaciones previas en el diseño de losetas de asfalto. Por un lado es necesario recalcar que se quiere probar que los tratamientos prueban el nivel de textura y los efectos que produce cada tratamiento; por lo tanto es un modelo de efectos fijos.

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (25)$$

$$Y_{i\cdot} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (26)$$

$$\bar{Y}_{i\cdot} = \frac{Y_{i\cdot}}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (27)$$

$$Y_{\cdot\cdot} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij} \quad (28)$$

$$\bar{Y}_{\cdot\cdot} = \frac{Y_{\cdot\cdot}}{N} \quad (29)$$

N : $a \cdot n$; Número total de observaciones

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0 \quad (30)$$

$$H_1: \tau_1 \neq 0 \text{ para al menos una } i \quad (31)$$

Si la hipótesis nula es verdadera no tiene efecto alguno cambiar los niveles de polímero para modificar la textura.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (32)$$

SS_T: Suma Total de Cuadrados

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 \quad (33)$$

La variabilidad total va a ser una función de la variabilidad de cada tratamiento y de la variabilidad que se produce en cada tratamiento.

La variabilidad total depende de la variabilidad intergrupo o inter tratamiento y de la variabilidad intra-grupo o intra-tratamiento.

$$SS_T = SS_{TRATAMIENTO} + SS_E \quad (34)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \text{Suma total de Cuadrados} \quad (35)$$

$$SS_{TRATAMIENTOS} = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 = \text{Suma de los Cuadrados de los Tratamientos} \quad (36)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 = \text{Suma de Cuadrados de error} \quad (37)$$

Valor del cuadrado de la suma de los tratamientos.

$$E(SS_{TRATAMIENTOS}) = (a - 1)\sigma^2 + n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 \quad (38)$$

$$\text{Si } H_0 \text{ es verdad: } n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 = 0 \quad (39)$$

Por lo tanto:

$$E\left(\frac{SS_{TRATAMIENTOS}}{a-1}\right) = \sigma^2 \quad (40)$$

$$E\left(\frac{SS_{TRATAMIENTOS}}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (41)$$

Cuadrado medio del error:

$$MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)} \quad (42)$$

Cuadrado de los tratamientos:

$$MS_{TRATAMIENTOS} = \frac{SS_{TRATAMIENTOS}}{a-1} \quad (43)$$

Fisher-Snedecor calculado:

$$F_O = \frac{\frac{SS_{TRATAMIENTOS}}{a-1}}{\frac{SS_E}{a(n-1)}} = \frac{MS_{TRATAMIENTOS}}{MS_E} \quad (44)$$

Fórmula para calcular la suma de cuadrados:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (45)$$

$$SS_{TRATAMIENTOS} = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{n} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (46)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{TRATAMIENTOS} \quad (47)$$

Tabla 11. Análisis de varianza para un experimento de textura superficial usando como factor un polímero con cuatro tratamientos.

| FUENTE DE VARIACIÓN | SUMA DE CUADRADOS | GRADOS DE LIBERTAD | MEDIAS DE CUADRADOS |
|------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| PORCENTAJE DE POLÍMERO | SS _{TRATAMIENTOS} | a-1 | MS _{TRATAMIENTOS} |
| ERROR | SS _E | a(n-1) | MS _E |
| TOTAL | SS _T | an-1 | |

Fuente: Esparza, S.

Fo= 3.10 (Montgomery & Runger, Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería, 2004)

$$P = P(F_{3,20} > F_{CALCULADO}) \cong \quad (48)$$

Si $P < \alpha$ Se rechaza H_0

El valor P indica la probabilidad de que la media muestral sea como mínimo tan extrema (tan alta o tan baja), como el valor obtenido en la realidad, siempre que el valor hipotético de μ sea cuatro. En este caso indica la probabilidad de que los resultados obtenidos de las muestras sean tan extremos como los valores obtenidos en realidad, siempre cuando las medias de los tratamientos sean cero.

En el software SWP se calcula esta probabilidad para una función de distribución acumulada F a través de la siguiente función:

$$FDist(x; n, m) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+m}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)\Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} \left(\frac{n}{m}\right)^{\frac{n}{2}} \int_0^x \mu^{\frac{n-2}{2}} \left(1 - \frac{n}{m}\mu\right)^{\frac{-n+m}{2}} du \quad (49)$$

X: F calculado= 2.8

n: grados de libertad del numerador $a-1=4-1=3$

m: grados de libertad del denominador $a(n-1)=4(3-1)=12-4=8$

∴

$F_{\text{CALCULADO}} > F_{\text{TABULADO}}$

2.8 > 3.2

∴

n=6

n: número de réplicas

Por lo tanto el número de losetas elaboradas por cada nivel del polímero será de 6, con una aproximación del 95%.

3.2 Fuente para las pruebas en asfaltos con mezclas asfálticas densas.

En el país, la utilización de mezclas abiertas o porosas es muy escasa o casi nula, por tal motivo se elaboró experimentalmente losetas de dicho material, mientras que, las mezclas cerradas o densas son ampliamente utilizadas, motivo por el cual se utilizó muestras en

campo en la ciudad de Loja, calle Perú, vía que fue recientemente re-asfaltada por parte del Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Loja, en ciertos puntos específicos en los cuales se procedió a la toma de fotografías y a la determinación de la textura superficial por el método del círculo de arena, figura 37.



Figura: 37. Ensayo del círculo de arena en campo.
Fuente: Esparza, S.

3.3 Determinación de la textura superficial por el método del círculo de arena NLT 335/87.

La norma española NLT 335/87. Norma que describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la textura superficial de un pavimento mediante el círculo de arena.

En general el ensayo es aplicable a cualquier tipo de pavimento, tanto bituminoso como de hormigón, y consiste en extender sobre su superficie un volumen determinado de arena fina, distribuyéndola y enrasándola posteriormente mediante un dispositivo adecuado.

A partir del volumen de arena utilizado y del área cubierta por la misma sobre el pavimento, se calcula una profundidad media de los huecos rellenos por la arena, valor que puede utilizarse como medida de la rugosidad o textura superficial del pavimento. Figura 38.

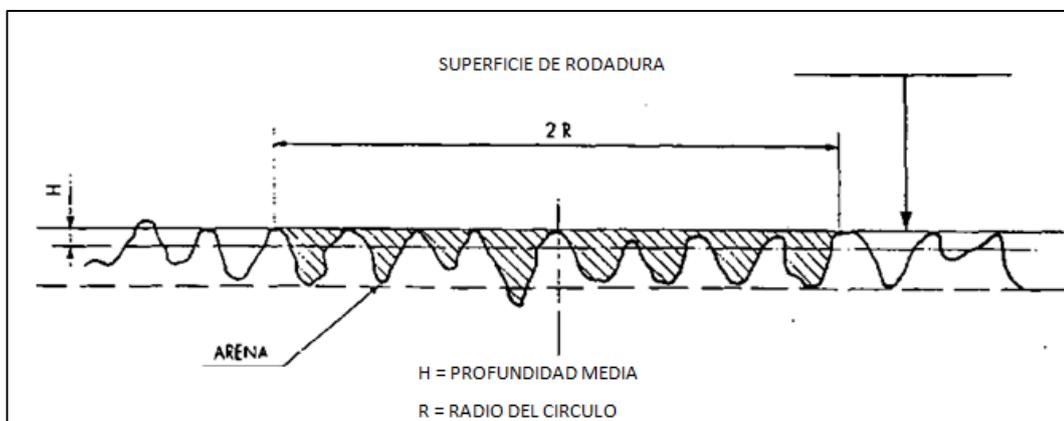


Figura: 38. Ensayo del círculo de arena.

Fuente: Norma NLT 335/87.

Esta norma utiliza los siguientes aparatos y materiales:

- Recipiente de 20 mm de diámetro interior y con la altura necesaria para que su volumen sea de 50 cm³.
- Un tampón para extender y enrasar la arena, formado por un disco de madera con mango, provisto en su cara inferior de un disco de goma dura.
- Una regla metálica o de plástico de 200 mm de longitud como mínimo y graduada en milímetros.
- Dos recipientes de plástico de boca ancha y para el transporte de la arena, de unos 2 litros de capacidad.
- Un cepillo de pelo blando.
- Arenas para ensayo. Se utilizó un tipo de arena silíceas, de grano redondeado, lavada y secada en estufa a temperaturas entre 110 °C, hasta temperatura constante, con las siguientes granulometría: Arena tipo 50-80, que pasa por el tamiz UNE 320 μm y queda retenida en el tamiz UNE 160 μm. Con una densidad de 1.24 gr/cm³; arena proveniente de Guaysimi, cantón Nangaritza provincia de Zamora Chinchipe.

Para el ensayo se realiza el siguiente procedimiento.

- Se eligen las zonas a ensayar, En cada loseta se realiza un mínimo de cinco mediciones.

- Se escoge el volumen de 50 cm³ y la granulometría de la arena es del tipo 50-80, esto en función de la textura del pavimento a ensayar, de tal forma que el radio del círculo resultante esté comprendido entre 5 y 18 cm y el tamaño máximo del grano no sea superior a la profundidad media obtenida.
- Se limpia la superficie de ensayo con el cepillo de pelo blando.
- Se llena de arena en exceso el recipiente cilíndrico elegido y se golpea ligeramente tres veces la base para asegurar la compactación; seguidamente se enrasa hasta los 50 cm³.
- Se vierte la totalidad de la arena del recipiente en el punto de ensayo en forma de superficie cónica y a continuación se la extiende con ayuda de la cara plana con goma del tampón, mediante movimientos rotatorios, hasta conseguir una superficie enrasada aproximadamente circular en la que la arena rellene todas las depresiones. El movimiento del tampón debe ser suave, sin ejercer presión, y deslizándolo sobre la superficie del pavimento.
- Finalmente, se mide con la regla el radio del círculo de arena, obteniéndose su valor con aproximación de 1 mm.

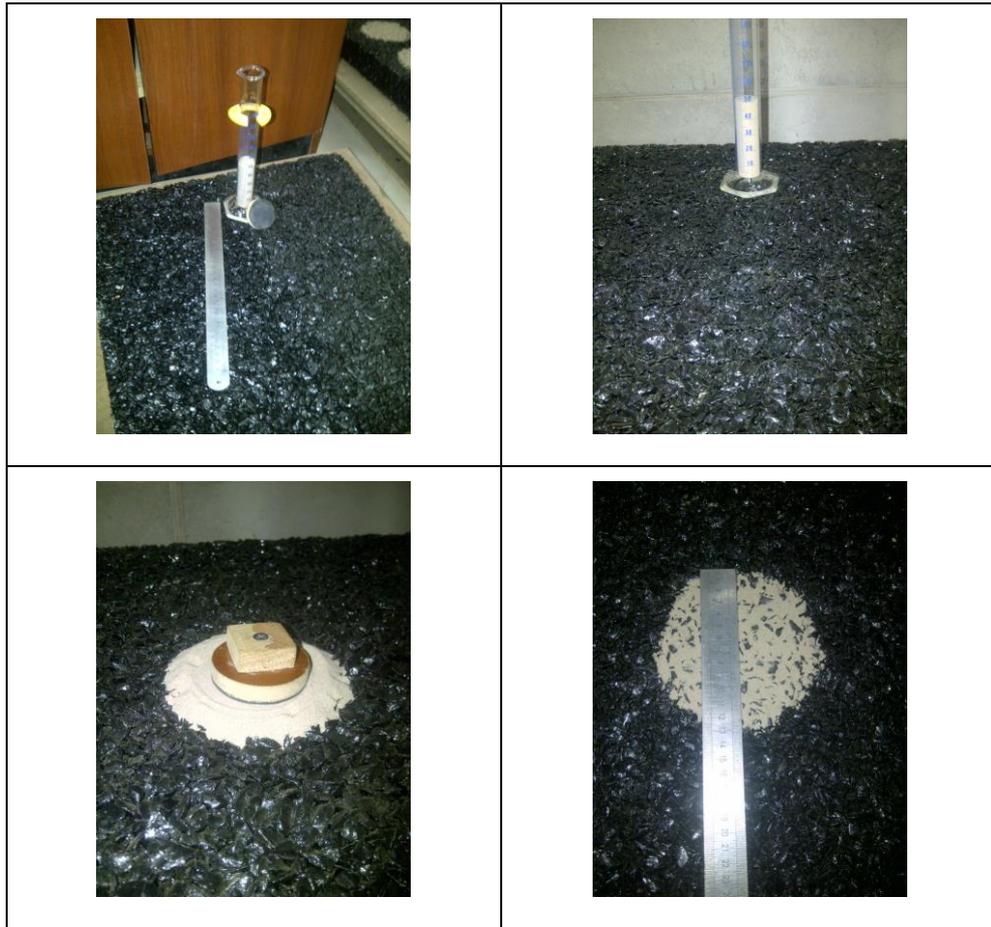


Figura: 39. Fotografías del Ensayo del círculo de arena.
Fuente: Esparza, S.

Para presentar los resultados de este ensayo se calcula la profundidad media de la arena utilizada, H, con aproximación de 0,05 mm por la fórmula:

$$H = V / (3.1416 * R^2) \quad (50)$$

dónde:

H = profundidad media de textura superficial, en mm

V = volumen de la arena utilizada, en mm³

R = radio medio del círculo de arena, en mm

De la cual se tomará como resultado del ensayo el valor promedio de, al menos, cinco mediciones obtenidas.

Con el procedimiento dado por la norma se procede a realizar los ensayos y se encuentran los resultados para las losetas elaboradas de asfalto drenante. Tabla 12.

Tabla 12. Resultados del ensayo del círculo de arena, asfalto drenante, Norma NLT 335/87.

| | PORCENTAJE DE POLÍMERO | 0% | 1% | 2% | 3% |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|------|
| | MUESTRA | | | | |
| H1 CÍRCULO DE ARENA (mm) | 1 | 4.78 | 4.29 | 4.47 | 3.36 |
| | 2 | 4.78 | 4.56 | 4.04 | 3.78 |
| | 3 | 5.08 | 4.44 | 3.52 | 4.57 |
| | 4 | 4.89 | 4.35 | 4.01 | 3.89 |
| | 5 | 4.95 | 4.51 | 4.28 | 4.07 |
| | 6 | 5.01 | 4.48 | 3.75 | 3.44 |

Fuente: Esparza, S.

Mientras que los resultados para las muestras en asfaltos con mezcla cerrada o densa fueron los expresados en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados del ensayo del círculo de arena, Asfalto denso, Norma NLT 335/87.

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CÍRCULO DE ARENA | 0.44 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.42 | 0.39 | 0.41 | 0.41 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.43 |

Fuente: Esparza, S.

3.4 MÉTODO GRÁFICO SOFTWARE SPIP.

El siguiente método es el método experimental con el que se pretende comparar los resultados del método del círculo de arena.

SPIP™ es un software desarrollado por "Image Metrology" empresa fundada en Dinamarca en 1998. La cual en la actualidad es la empresa líder en proveer software de procesamiento de imágenes de " nano - microscopía". Cuya misión es proveer a sus clientes con el software de procesamiento de imágenes para microscopía, incluyendo:

- Herramientas de corrección para la creación de una presentación más precisa de la superficie "real".
- Técnicas de análisis automatizados que garantizan una alta eficiencia en la precisión, calidad y en el costo; basadas en normas ISO.
- Herramientas de visualización y presentación de informes que permiten una comunicación convincente e impresionante de los resultados. (Image Metrology Web).

El software SPIP™ desarrollado inicialmente en el año 2003, (Image Metrology Web), ha logrado con los años, convertirse en el procesador de imágenes de sonda de barrido, y se ha convertido en el estándar *de-facto* para el procesamiento de imágenes a nano escala, pero su uso no solo se limita a estas medidas sino también diferentes escalas en las cuales los usuarios la puedan manejar. (Image Metrology, 2013)

SPIP™ es un paquete software que ofrece un módulo básico y 14 complementos opcionales dedicada a fines específicos.



Figura 40: Página principal del software SPIP™.

Fuente: *Image Metrology*.

SPIP™ se utiliza para diversos fines, entre ellos: Inspección de Semiconductores, Física, Química, Biología, Metrología y Nano Tecnología. También es ampliamente utilizado para la investigación académica y sus publicaciones. Por cuanto es un producto que contiene muchas herramientas de análisis y visualización que se pueden aplicar en diferentes tipos de imágenes y en histogramas, por ejemplo, en imágenes de microscopios electrónicos de interferencia, en corregir y analizar datos de Microscopios de Barrido por Sonda (SPM), incluyendo análisis de la curva de fuerza y continua Imaging Tunneling Spectroscopy (CITS); así mismo en imágenes más sencillas tomadas con una cámara fotográfica.

3.4.1 Preparación de imágenes.

El presente método inicia con la toma de las fotografías a inspeccionar dentro del procesador de imágenes SPIP™, la cual se realizó con una cámara Nikon D5100 con 16.2 Megapíxeles, para todas las imágenes del estudio, fotografías tomadas en un ambiente con una iluminación constante y sin variaciones acogiendo las recomendaciones hechas por (Elunai, Chandran, & Gallagher, 2011). Cada fotografía fue realizada con la ayuda de un trípode para mantener una distancia aproximadamente de 75cm constante entre todas las

fotografías de todas las losetas de estudio, así mismo las capturas se las realizó utilizando un ángulo $\phi=90^\circ$. Como se muestra en la Figura 41.

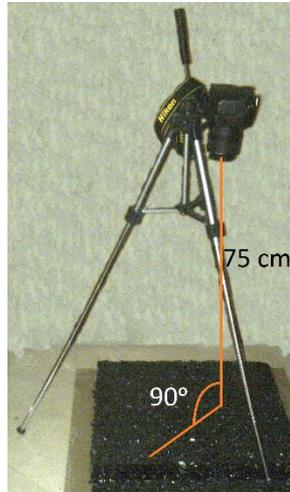


Figura 41: Toma de fotografías.
Fuente: Esparza, S.

Las fotografías en el momento de su captura y por defecto de la cámara fotográfica resultan con la medida de 4928 x 3264 píxeles, mediante la utilización de cualquier software en modificación de imágenes se procedió a recortar la fotografía hasta una medida de 1537 x 1537 píxeles, (Figura 42), con el fin de utilizar una medida uniforme para todos los procesamientos en el software SPIP™.

| | |
|---|---|
| | |
| <p>Fotografía original 4928 x 3264 píxeles.</p> | <p>Fotografía a procesar 1537 x 1537 píxeles.</p> |

Figura 42: Corte de imágenes.
Fuente: Esparza, S.

Cabe destacar que el momento de tomar la fotografía es necesario ubicar en la misma algún objeto con una medida conocida con la cual poder realizar al final la conversión de píxeles a milímetros.

Ejemplo: 1cm. = 72 píxeles ∴ 1mm. = 7.2 píxeles.
 Factor = 1mm. / 7.2 píxeles = 0.139 mm/píxeles.
 Corte de fotografía: 1536 píxeles * 0.139 mm/píxeles = 213.83 mm

3.4.2 Resultados del método gráfico midiendo partículas y poros.

Utilizando el método descrito en el anexo A se logra establecer los siguientes resultados de textura superficial para las losetas, de asfalto drenante, elaboradas para este fin.

Tabla 15. Resultados de la textura superficial, de asfaltos drenantes, utilizando el software SPIP™.

| | PORCENTAJE DE POLÍMERO | 0% | 1% | 2% | 3% |
|-----------------|------------------------|------|------|------|------|
| | MUESTRA | | | | |
| H SPIP P&P (mm) | 1 | 6.08 | 4.52 | 3.72 | 2.92 |
| | 2 | 6.28 | 5.87 | 4.04 | 4.18 |
| | 3 | 5.29 | 6.39 | 4.60 | 3.02 |
| | 4 | 5.88 | 4.87 | 4.11 | 3.38 |
| | 5 | 5.97 | 5.34 | 4.43 | 3.86 |
| | 6 | 5.92 | 5.76 | 3.93 | 3.25 |

Fuente: Esparza, S.

Ahora, en la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos utilizando el método de Partículas y Poros del software SPIP, para mezclas asfálticas densas.

Tabla 16. Resultados de la textura superficial, de asfaltos densos, utilizando el software SPIP™.

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PARTICULAS Y POROS (mm) | 2.89 | 2.11 | 2.62 | 2.96 | 4.86 | 6.36 | 3.05 | 4.93 | 4.63 | 7.22 | 2.94 | 4.60 | 2.86 | 2.43 | 3.41 | 5.20 | 3.98 | 4.17 | 3.89 | 2.22 | 5.29 | 4.57 | 1.97 | 7.03 | 2.64 |

Fuente: Esparza, S.

3.4.3 Resultados del método gráfico utilizando metrología superficial.

Mediante la utilización de los parámetros de metrología superficial descritos en 2.4 y en 2.5 se puede observar que existe una estrecha relación entre el parámetro Sa y la altura H del círculo de arena, con esto se procedió a medir este parámetro con el fin de compararlo con los resultados del círculo de arena, estos datos se presentan en la tabla 17, para asfaltos drenantes, y en la tabla 18 para asfaltos densos.

Tabla 17. Resultados de la textura superficial en asfaltos drenantes, utilizando parámetro Sa.

| | PORCENTAJE DE POLÍMERO | 0% | 1% | 2% | 3% |
|---------|------------------------|------|------|------|------|
| | MUESTRA | | | | |
| Sa (mm) | 1 | 5.05 | 5.40 | 5.57 | 4.64 |
| | 2 | 5.18 | 6.48 | 6.47 | 6.74 |
| | 3 | 4.93 | 6.87 | 7.15 | 5.26 |
| | 4 | 5.05 | 6.25 | 6.42 | 5.63 |
| | 5 | 5.13 | 5.96 | 6.13 | 5.46 |
| | 6 | 4.96 | 6.13 | 5.98 | 6.12 |

Fuente: Esparza, S.

Tabla 18. Resultados de la textura superficial en asfaltos densos, utilizando parámetro Sa.

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RUGOSIDAD Sa (mm) | 1.76 | 1.05 | 1.56 | 1.39 | 1.52 | 1.03 | 1.32 | 1.03 | 1.21 | 1.06 | 1.25 | 1.07 | 1.22 | 1.06 | 1.33 | 1.13 | 1.25 | 1.07 | 1.37 | 1.26 | 1.16 | 0.98 | 1.36 | 1.54 | 1.30 |

Fuente: Esparza, S.

3.5 Comparación de las texturas superficiales h obtenidas con el método del círculo de arena y con el programa SPIP™.

Para realizar la comparación de las texturas superficiales obtenidas mediante el círculo de arena y con el software SPIP™, se realiza mediante un análisis de Chi-cuadrado (análisis estadístico), descrito en el apartado 3.1.2, para el número de losetas a experimentar, ahora se lo hace con el fin de comprobar las hipótesis planteadas.

HIPOTESIS:

Ho: No existe diferencias de medida de la textura superficial entre el método del círculo de arena y las medidas arrojadas por el software SPIP.

Hi: Si existe diferencias de medida de la textura superficial entre el método del círculo de arena y las medidas arrojadas por el software SPIP.

NIVEL DE SIGNIFICANCIA

$\alpha = 0.05$

P = 0.95

ESTADISTICO DE PRUEBA

$$X^2_{calculado} = \sum \frac{(T_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (51)$$

REGLA DE DECISIÓN

$$X^2_{calculado} > X^2_{tabulado} \quad (52)$$

Si sucede esto rechazar H_0 .

GRADOS DE LIBERTAD:

$$\begin{array}{l} n = n-1 \quad 6-1 = 5 \\ a = a-1 \quad 4-1 = 3 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 15$$

$X^2_{Tabulado} = 7.2609$, con 15 grados de libertad y probabilidad del 0.95

Tabla 19. Chi cuadrado entre H de círculo de arena y H del análisis de partículas y poros en asfaltos drenantes.

| PORCENTAJE DE POLÍMERO | MUESTRA | H1 CIRCULO DE ARENA (mm) ESPERADO | H SPIP P&P (mm) OBSERVADO | O-E | (O-E)^2 | (O-E)^2/E |
|------------------------|---------|-----------------------------------|---------------------------|--------|---------|--------------|
| 0% | 1 | 4.78 | 6.08 | 1.300 | 1.689 | 0.353 |
| | 2 | 4.78 | 6.28 | 1.500 | 2.249 | 0.470 |
| | 3 | 5.08 | 5.29 | 0.215 | 0.046 | 0.009 |
| | 4 | 4.89 | 5.88 | 0.990 | 0.979 | 0.200 |
| | 5 | 4.95 | 5.97 | 1.020 | 1.040 | 0.210 |
| | 6 | 5.01 | 5.92 | 0.906 | 0.820 | 0.164 |
| 1% | 1 | 4.29 | 4.52 | 0.229 | 0.052 | 0.012 |
| | 2 | 4.56 | 5.87 | 1.313 | 1.725 | 0.379 |
| | 3 | 4.44 | 6.39 | 1.954 | 3.819 | 0.861 |
| | 4 | 4.35 | 4.87 | 0.520 | 0.270 | 0.062 |
| | 5 | 4.51 | 5.34 | 0.830 | 0.689 | 0.153 |
| | 6 | 4.48 | 5.76 | 1.280 | 1.638 | 0.366 |
| 2% | 1 | 4.47 | 3.72 | -0.746 | 0.556 | 0.124 |
| | 2 | 4.04 | 4.04 | 0.004 | 0.000 | 0.000 |
| | 3 | 3.52 | 4.60 | 1.076 | 1.157 | 0.328 |
| | 4 | 4.01 | 4.11 | 0.096 | 0.009 | 0.002 |
| | 5 | 4.28 | 4.43 | 0.150 | 0.022 | 0.005 |
| | 6 | 3.75 | 3.93 | 0.180 | 0.032 | 0.009 |
| 3% | 1 | 3.36 | 2.92 | -0.442 | 0.196 | 0.058 |
| | 2 | 3.78 | 4.18 | 0.401 | 0.161 | 0.043 |
| | 3 | 4.57 | 3.02 | -1.552 | 2.409 | 0.527 |
| | 4 | 3.89 | 3.38 | -0.507 | 0.257 | 0.066 |
| | 5 | 4.07 | 3.86 | -0.210 | 0.044 | 0.011 |
| | 6 | 3.44 | 3.25 | -0.190 | 0.036 | 0.010 |
| SUMATORIA: | | | | | | 4.424 |

Fuente: Esparza, S.

$$X^2_{calculado} = 4.424 < X^2_{Tabulado} = 7.2609$$

Por lo tanto: No se rechaza Ho.

Tabla 20. Chi cuadrado entre H de círculo de arena y H del análisis de rugosidad Sa en asfaltos drenantes.

| PORCENTAJE DE POLÍMERO | MUESTRA | H1 CIRCULO DE ARENA (mm) ESPERADO | Sa (mm) OBSERVADO | O-E | (O-E)^2 | (O-E)^2/E |
|------------------------|---------|-----------------------------------|-------------------|--------|------------|-----------|
| 0% | 1 | 4.78 | 5.05 | 0.270 | 0.073 | 0.015 |
| | 2 | 4.78 | 5.18 | 0.400 | 0.160 | 0.033 |
| | 3 | 5.08 | 4.93 | -0.144 | 0.021 | 0.004 |
| | 4 | 4.89 | 5.05 | 0.164 | 0.027 | 0.006 |
| | 5 | 4.95 | 5.13 | 0.180 | 0.032 | 0.007 |
| | 6 | 5.01 | 4.96 | -0.050 | 0.002 | 0.000 |
| 1% | 1 | 4.29 | 5.40 | 1.106 | 1.223 | 0.285 |
| | 2 | 4.56 | 6.48 | 1.926 | 3.711 | 0.814 |
| | 3 | 4.44 | 6.87 | 2.436 | 5.934 | 1.338 |
| | 4 | 4.35 | 6.25 | 1.896 | 3.595 | 0.827 |
| | 5 | 4.51 | 5.96 | 1.450 | 2.103 | 0.466 |
| | 6 | 4.48 | 6.13 | 1.650 | 2.723 | 0.608 |
| 2% | 1 | 4.47 | 5.57 | 1.107 | 1.225 | 0.274 |
| | 2 | 4.04 | 6.47 | 2.436 | 5.934 | 1.471 |
| | 3 | 3.52 | 7.15 | 3.626 | 13.151 | 3.731 |
| | 4 | 4.01 | 6.42 | 2.409 | 5.806 | 1.448 |
| | 5 | 4.28 | 6.13 | 1.850 | 3.423 | 0.800 |
| | 6 | 3.75 | 5.98 | 2.230 | 4.973 | 1.326 |
| 3% | 1 | 3.36 | 4.64 | 1.277 | 1.631 | 0.485 |
| | 2 | 3.78 | 6.74 | 2.959 | 8.757 | 2.318 |
| | 3 | 4.57 | 5.26 | 0.688 | 0.474 | 0.104 |
| | 4 | 3.89 | 5.63 | 1.742 | 3.034 | 0.780 |
| | 5 | 4.07 | 5.46 | 1.390 | 1.932 | 0.475 |
| | 6 | 3.44 | 6.12 | 2.680 | 7.182 | 2.088 |
| | | | | | SUMATORIA: | 19.702 |

Fuente: Esparza, S.

$$X^2_{calculado} = 19.702 > X^2_{Tabulado} = 7.2609$$

Por lo tanto: Se rechaza Ho.

Para realizar la comparación entre los resultados obtenidos mediante el círculo de arena y los concernientes al análisis de partículas y poros y al parámetro de rugosidad Sa, se realizó, un análisis de t de Student, para comprobar si existe correlación. Así mismo se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: R=0 El coeficiente de correlación R obtenido procede de una población cuya correlación es cero ($\rho = 0$).

H1: $R = 0$ El coeficiente de correlación R obtenido procede de una población cuyo coeficiente de correlación es distinto de cero ($\rho \neq 0$).

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Grados de libertad = $n - 2 = 25 - 2 = 23$

Regla de decisión:

$$t > t_{(\alpha, n-2)} \quad (53)$$

Se rechaza la hipótesis nula.

T calculado:

$$t = \frac{r_{xy} - 0}{\sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{n - 2}}} \quad (54)$$

t tabulado:

$$t_{(\alpha, n-2)} = 1.7139$$

Correlación existente entre H de círculo de arena y H del análisis de partículas y poros en asfaltos densos.

Tabla 21. t de Student entre H de círculo de arena y H del análisis de partículas y poros en asfaltos densos.

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CIRCULO DE ARENA (mm) | 0.44 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.42 | 0.39 | 0.41 | 0.41 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.43 |
| PARTICULAS Y POROS CORREGIDO (mm) | 0.30 | 0.22 | 0.28 | 0.31 | 0.51 | 0.67 | 0.32 | 0.52 | 0.49 | 0.76 | 0.31 | 0.49 | 0.30 | 0.26 | 0.36 | 0.55 | 0.42 | 0.44 | 0.41 | 0.23 | 0.56 | 0.48 | 0.21 | 0.74 | 0.28 |

R = -0.2041724

Fuente: Esparza, S.

$$t = 1.00024$$

$$t = 1.00024 < t_{(0.05, 23)} = 1.7139$$

Por lo tanto: No se rechaza la Hipótesis nula. La correlación obtenida procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Se concluye que ambas variables no están relacionadas.

Correlación existente entre H de círculo de arena y H del análisis de rugosidad Sa en asfaltos densos.

Tabla 22. t de Student entre H de círculo de arena y H del análisis de rugosidad Sa en asfaltos densos.

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CIRCULO DE ARENA (mm) | 0.44 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.42 | 0.39 | 0.41 | 0.41 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.43 |
| RUGOSIDAD CORREGIDA (mm) | 0.59 | 0.35 | 0.52 | 0.46 | 0.51 | 0.34 | 0.44 | 0.34 | 0.40 | 0.35 | 0.42 | 0.36 | 0.40 | 0.35 | 0.44 | 0.38 | 0.42 | 0.36 | 0.46 | 0.42 | 0.39 | 0.33 | 0.45 | 0.51 | 0.43 |

R= 0.7017587

Fuente: Esparza, S.

t= 4.72409

$t = 4.72409 > t_{(0.05,23)} = 1.7139$

Se rechaza Ho, hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0.05. La correlación obtenida no procede de una población caracterizada por una correlación de cero. Se concluye que ambas variables están relacionadas

3.6 Análisis de resultados.

Basándose en las hipótesis planteadas para el análisis de Chi-Cuadrado:

Ho: No existe diferencias de medida de la textura superficial entre el método del círculo de arena y las medidas arrojadas por el software SPIP™.

Hi: Si existe diferencias de medida de la textura superficial entre el método del círculo de arena y las medidas arrojadas por el software SPIP™

Con la regla de decisión:

$$X^2_{calculado} > X^2_{tabulado} \tag{55}$$

Rechazar H_0

Y los resultados obtenidos luego del análisis estadístico entre H de círculo de arena y H del análisis de partículas y poros en asfaltos drenantes es de:

$$X^2_{calculado} = 4.424 < X^2_{Tabulado} = 7.2609$$

Con estos datos obtenidos y de acuerdo a la regla de decisión planteada, No se rechaza H_0 , por lo tanto, se acepta la hipótesis planteada en H_0 ; lo cual dice que “no existen diferencias de medida de la textura superficial entre el método del círculo de arena y las medidas arrojadas por el software SPIP™”.

Consecuentemente se puede afirmar que los valores de textura superficial encontrados, utilizando el método planteado en la presente investigación son comparables y aceptados como un valor que nos da el ensayo del círculo de arena, expresada en la norma española NLT 335/87, esto para un pavimento drenante.

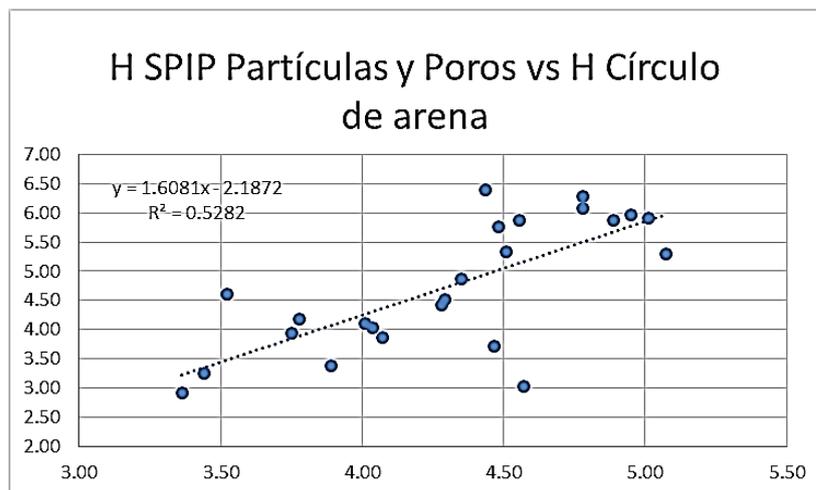


Figura 43: Dispersión entre H SPIP Partículas y Poros y H Círculo de arena en mezclas porosas. Fuente: Esparza, S.

Se observa un $R^2=0.5282$, el cual nos da a conocer que existe una relación pero esta no es representativa, en la figura 44, se tiene el mismo conjunto de datos, ajustando los valores atípicos se observa un $R^2=0.9156$, el cual ya es un valor admisible y se puede decir que los valores obtenidos mediante el software SPIP para asfaltos drenantes utilizando el análisis de partículas y poros, es aceptable y se considera un método para conocer la textura superficial de un asfalto drenante.

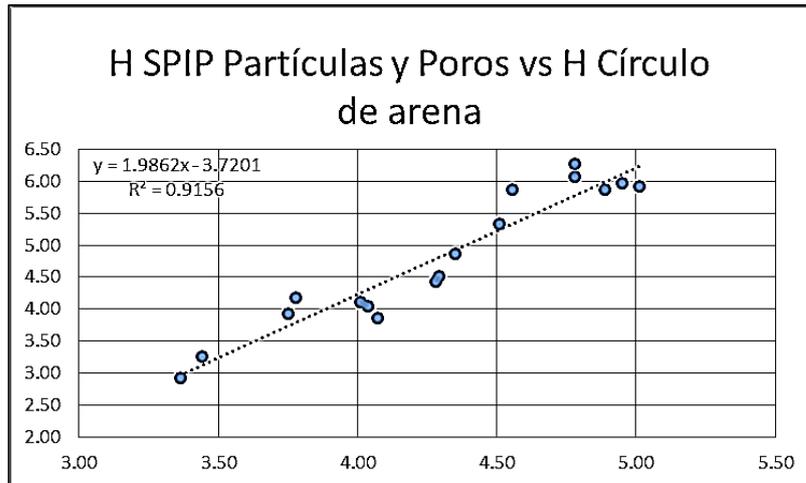


Figura 44: Dispersión corregida entre H SPIP Partículas y Poros y H Círculo de arena de mezclas porosas
Fuente: Esparza, S.

Ahora, analizando lo que ocurre en el caso entre H círculo de arena y el parámetro de rugosidad S_a , se observa lo siguiente:

$$X^2_{calculado} = 19.702 > X^2_{Tabulado} = 7.2609$$

Por lo tanto se rechaza H_0 , si existen diferencias de medida de la textura superficial entre el método del círculo de arena y las medidas arrojadas por el software SPIP, en el caso de la rugosidad S_a .

Esto se observa en la gráfica de dispersión (figura 45), y además con factor R^2 sumamente bajo, que representa que alrededor de 20% de los resultados son compartidos, por lo tanto no se lo consideraría un método fiable para predecir el valor de H del círculo de arena.

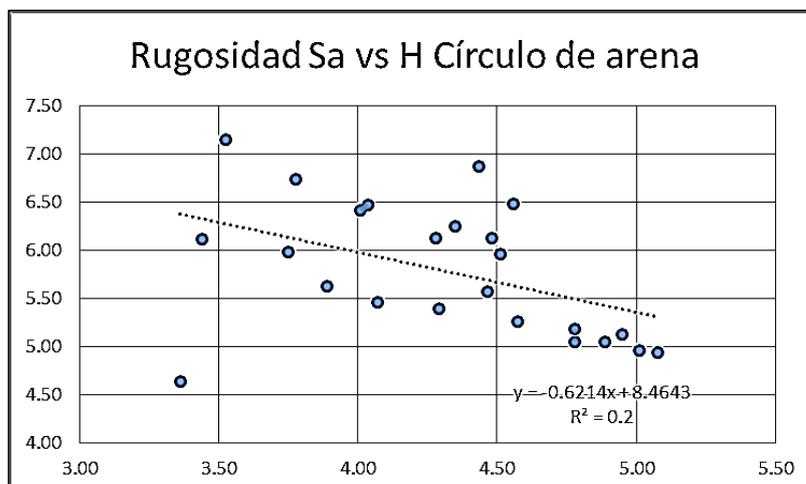


Figura 45: Dispersión entre H rugosidad S_a y H Círculo de arena en mezclas abiertas.
Fuente: Esparza, S.

También si se analiza la influencia de la adición del polímero SBS en sus diferentes porcentajes al ligante asfáltico, se observa que mediante mayor sea la adición del polímero, la textura superficial del pavimento drenante va a disminuir. Esto se puede observar en la siguiente figura.

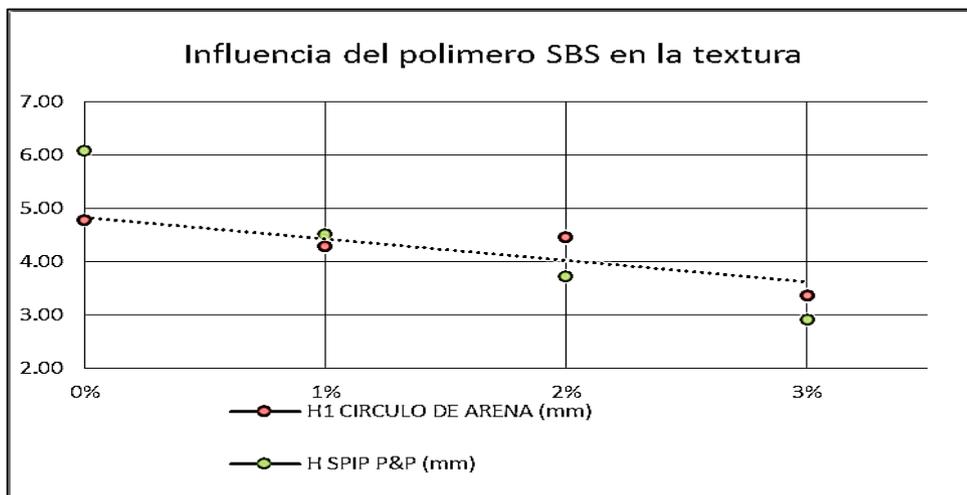


Figura 46: Medida de la textura superficial en relación al % de polímero utilizado. Fuente: Esparza, S.

En el caso de la mezcla asfáltica densa o cerrada se hizo un análisis con t de Student, en el cual se observa que para el caso en que se relaciona H círculo de arena con H análisis de partículas y poros no existe una correlación válida, figura 47.

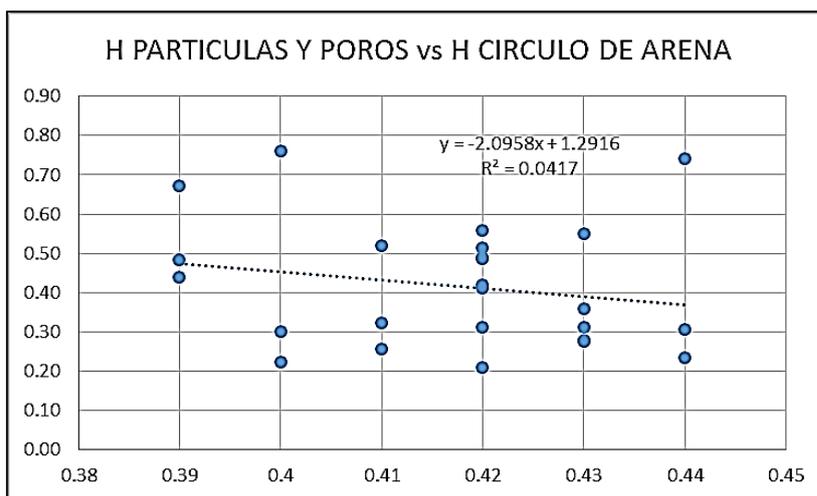


Figura 47: Dispersión entre H SPIP Partículas y Poros y H Círculo de arena, en mezclas cerradas. Fuente: Esparza, S.

Motivo por el cual se determina que no existe relación entre los valores obtenidos mediante el análisis de partículas y poros y los valores de H del círculo de arena; para mezclas

asfálticas densas. Por consiguiente este no sería un método válido para obtener un valor de textura superficial mediante el software SPIP para este tipo de mezclas.

Mientras que realizando el análisis con t de Student, para la relación entre H círculo de arena con H análisis de rugosidad Sa, se observa que si existe una relación. Por cuanto, se cumple la regla de decisión y se obtiene un $R^2 = 0.4925$ como se muestra en la gráfica de dispersión, figura 48.

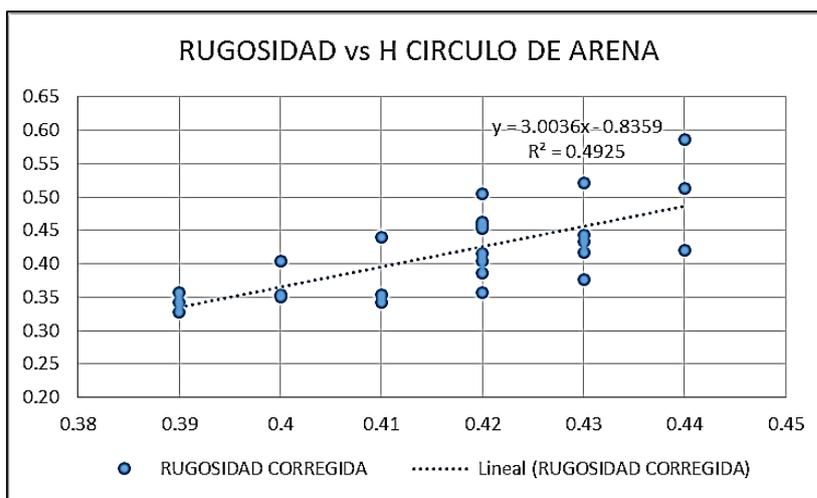


Figura 48: Dispersión entre H SPIP Rugosidad Sa y H Círculo de arena, en mezclas cerradas. Fuente: Esparza, S.

Ahora si bien la correlación es mejor en este caso, los valores son mucho más altos que los del círculo de arena, por este motivo, se propone para este caso en particular la siguiente fórmula de ajuste, con el fin de que los valores obtenidos mediante el método de rugosidad Sa, sean tomados como valor de la textura superficial de un asfalto de mezcla cerrada.

$$H_{\text{Circulo de arena}} = 0.333 * H_{\text{Rugosidad Sa}} \quad (56)$$

Con la aplicación de esta fórmula se obtienen los siguientes datos para la rugosidad Sa:

Tabla 23. Datos de rugosidad Sa corregidos.

| MUESTRA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CIRCULO DE ARENA | 0.44 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.42 | 0.39 | 0.41 | 0.41 | 0.42 | 0.40 | 0.43 | 0.42 | 0.40 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.42 | 0.39 | 0.42 | 0.44 | 0.43 |
| RUGOSIDAD Sa (mm) CORREGIDA | 0.59 | 0.35 | 0.52 | 0.46 | 0.51 | 0.34 | 0.44 | 0.34 | 0.40 | 0.35 | 0.42 | 0.36 | 0.40 | 0.35 | 0.44 | 0.38 | 0.42 | 0.36 | 0.46 | 0.42 | 0.39 | 0.33 | 0.45 | 0.51 | 0.43 |

Fuente: Esparza, S.

El análisis con los parámetros de metrología superficial también arroja más datos importantes, descritos en las siguientes tablas:

Tabla 24. Parámetros adicionales de metrología superficial en mezclas asfálticas drenantes.

| PORCENTAJE DE POLÍMERO | MUESTRA | Kurtosis | Simetría | Curva de Abbott | | | | | Longitud de Correlación |
|------------------------|---------|----------|----------|-----------------|----------|---------|----------|----------|-------------------------|
| | | | | Spk (mm) | Smr1 (%) | Sk (mm) | Smr2 (%) | Svk (mm) | |
| 0% | 1 | 3.200 | 0.386 | 8.272 | 11.244 | 16.347 | 91.529 | 4.188 | 25.900 |
| | 2 | 3.592 | 0.552 | 9.651 | 12.351 | 15.935 | 90.787 | 4.157 | 28.630 |
| | 3 | 3.036 | 0.347 | 7.775 | 11.928 | 15.723 | 91.724 | 4.329 | 26.857 |
| | 4 | 3.165 | 0.458 | 8.457 | 11.852 | 15.429 | 91.487 | 4.254 | 27.470 |
| | 5 | 3.287 | 0.376 | 8.367 | 12.058 | 15.872 | 91.358 | 4.395 | 26.140 |
| | 6 | 3.094 | 0.351 | 9.241 | 11.467 | 16.175 | 91.692 | 4.308 | 27.950 |
| 1% | 1 | 3.003 | 0.303 | 8.454 | 11.157 | 17.310 | 90.829 | 4.571 | 20.714 |
| | 2 | 2.913 | 0.240 | 9.128 | 10.690 | 21.296 | 91.813 | 5.799 | 23.267 |
| | 3 | 2.663 | 0.019 | 7.877 | 9.293 | 22.921 | 91.010 | 6.629 | 29.327 |
| | 4 | 2.943 | 0.285 | 8.923 | 9.856 | 20.596 | 91.387 | 5.489 | 25.985 |
| | 5 | 2.768 | 0.241 | 8.152 | 10.965 | 21.187 | 91.248 | 4.972 | 26.942 |
| | 6 | 2.863 | 0.312 | 7.954 | 10.729 | 21.358 | 91.548 | 5.898 | 27.412 |
| 2% | 1 | 3.313 | 0.624 | 10.669 | 13.775 | 16.950 | 92.406 | 3.724 | 17.009 |
| | 2 | 3.292 | 0.572 | 11.741 | 12.898 | 20.306 | 92.834 | 4.621 | 18.800 |
| | 3 | 2.744 | 0.242 | 9.751 | 11.117 | 23.376 | 91.546 | 5.602 | 22.015 |
| | 4 | 3.085 | 0.493 | 10.963 | 12.845 | 21.953 | 91.852 | 4.874 | 19.874 |
| | 5 | 2.942 | 0.525 | 11.348 | 11.984 | 22.712 | 91.463 | 5.654 | 20.964 |
| | 6 | 3.269 | 0.547 | 10.843 | 13.857 | 20.652 | 92.752 | 5.358 | 18.640 |
| 3% | 1 | 3.032 | 0.413 | 7.709 | 12.382 | 14.625 | 91.796 | 3.489 | 20.571 |
| | 2 | 2.939 | 0.399 | 10.610 | 12.256 | 21.617 | 92.231 | 4.932 | 21.782 |
| | 3 | 3.865 | 0.875 | 12.409 | 14.220 | 15.350 | 92.830 | 3.291 | 14.352 |
| | 4 | 3.195 | 0.506 | 10.842 | 13.060 | 16.460 | 92.080 | 3.849 | 19.875 |
| | 5 | 3.388 | 0.486 | 8.956 | 12.945 | 17.974 | 92.188 | 3.800 | 18.784 |
| | 6 | 3.732 | 0.658 | 9.481 | 13.953 | 18.070 | 91.784 | 4.284 | 20.540 |

Fuente: Esparza, S.

Tabla 25. Parámetros adicionales de metrología superficial en mezclas asfálticas densas.

| MUESTRA | Kurtosis | Simetría | Curva de Abbott | | | | | Longitud de Correlación |
|---------|----------|----------|-----------------|----------|---------|----------|----------|-------------------------|
| | | | Spk (mm) | Smr1 (%) | Sk (mm) | Smr2 (%) | Svk (mm) | |
| 1 | 3.187 | 0.13965 | 2.6052 | 10.643 | 5.7721 | 91.85 | 1.8863 | 1.1511 |
| 2 | 3.6384 | -0.12023 | 1.5993 | 8.9525 | 3.3732 | 89.341 | 1.4776 | 1.3921 |
| 3 | 3.5274 | 0.30027 | 2.649 | 12.005 | 4.9297 | 91.52 | 1.638 | 0.85714 |
| 4 | 3.0756 | -0.17273 | 1.857 | 8.6923 | 4.5871 | 89.771 | 1.7248 | 0.86304 |
| 5 | 4.2216 | 0.53443 | 2.9791 | 11.953 | 4.7369 | 91.766 | 1.5389 | 0.85339 |
| 6 | 3.7536 | -0.06679 | 1.5862 | 10.316 | 3.2704 | 89.526 | 1.4373 | 1.2896 |
| 7 | 5.9088 | 1.0574 | 3.265 | 15.148 | 3.6904 | 91.683 | 1.2997 | 0.84718 |
| 8 | 4.5336 | 0.01802 | 1.9789 | 8.7574 | 3.1562 | 87.699 | 1.5253 | 1.1335 |
| 9 | 6.5883 | 1.0786 | 3.1296 | 14.589 | 3.3772 | 91.338 | 1.3433 | 0.71663 |
| 10 | 4.8407 | 0.22506 | 2.1416 | 8.4775 | 3.3734 | 89.543 | 1.449 | 1.2766 |
| 11 | 7.2292 | 1.2812 | 3.4955 | 14.267 | 3.4383 | 90.744 | 1.296 | 0.99941 |
| 12 | 5.3958 | 0.35991 | 2.2073 | 10.559 | 3.2586 | 89.489 | 1.5312 | 0.98838 |
| 13 | 6.5029 | 1.0918 | 3.0682 | 13.875 | 3.4957 | 91.473 | 1.1932 | 1.0072 |
| 14 | 6.0428 | 0.69143 | 2.401 | 11.475 | 3.2399 | 90.532 | 1.2638 | 1.8241 |
| 15 | 6.3587 | 1.0214 | 3.3989 | 13.937 | 3.7848 | 91.651 | 1.4784 | 0.99563 |

| MUESTRA | Kurtosis | Simetría | Curva de Abbott | | | | | Longitud de Correlación |
|---------|----------|----------|-----------------|----------|---------|----------|----------|-------------------------|
| | | | Spk (mm) | Smr1 (%) | Sk (mm) | Smr2 (%) | Svk (mm) | Sal (mm) |
| 16 | 7.0654 | 1.0922 | 2.7232 | 14.911 | 3.1736 | 91.173 | 1.2614 | 1.412 |
| 17 | 7.1902 | 1.3067 | 3.4051 | 14.131 | 3.4815 | 91.508 | 1.2418 | 0.98515 |
| 18 | 8.6036 | 1.4106 | 2.9662 | 14.131 | 2.9979 | 90.567 | 1.1522 | 1.1422 |
| 19 | 4.6079 | 0.74905 | 1.5862 | 13.463 | 4.174 | 92.448 | 1.235 | 1.285 |
| 20 | 5.5943 | 1.0509 | 2.8397 | 15.27 | 3.559 | 91.842 | 1.142 | 1.3921 |
| 21 | 6.9121 | 1.2418 | 2.9732 | 14.691 | 3.2502 | 91.679 | 1.128 | 0.98902 |
| 22 | 6.7785 | 1.0975 | 3.0634 | 13.56 | 2.8766 | 92.111 | 0.95111 | 2.2361 |
| 23 | 5.5581 | 0.87122 | 2.5614 | 13.954 | 3.9668 | 91.689 | 1.5135 | 0.71663 |
| 24 | 3.5835 | 0.30765 | 3.1339 | 11.918 | 4.8633 | 91.619 | 1.6247 | 0.85453 |
| 25 | 6.9281 | 1.2566 | 2.6512 | 13.917 | 3.706 | 91.668 | 1.2455 | 0.85664 |

Fuente: Esparza, S.

Si bien, por definiciones descritas en 2.5; los asfaltos con una mezcla asfáltica drenante tiene valores de Kurtosis alrededor de tres (o muy cercanos a tres), lo cual nos indica que todas las losetas experimentales tienen una distribución gaussiana con presencia uniforme de valles y picos. La Asimetría mostrada, indica que los picos se distribuyen de manera uniforme positivamente. La longitud de correlación se observa valores altos, lo que nos indica longitudes de onda largas, lo que es correcto ya que se observa picos y valles, más pronunciados, figura 49.

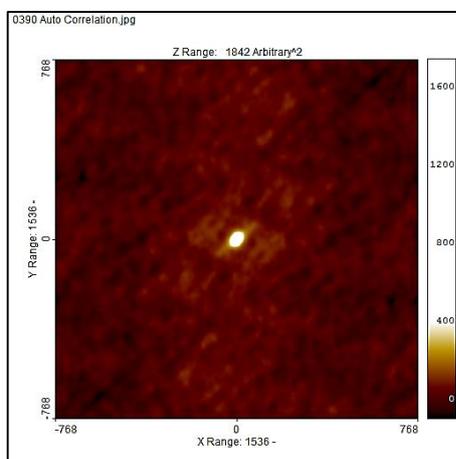


Figura 49: Longitud de correlación en mezclas abiertas.

Fuente: Esparza, S.

Los valores de la curva de Abbott son la representación gráfica de la curva de porcentaje de material la que se cuenta desde el punto más alto de la superficie (donde la curva es igual a 0%) a su punto más bajo (donde la curva alcanza el 100%). Los picos más altos están en promedio representando un 12.75% del material dentro de la imagen, con valores altos, el

rango intermedio se observa la mayor cantidad del material (80%), y los valles más profundos en un rango del 8.5%. figura 50.

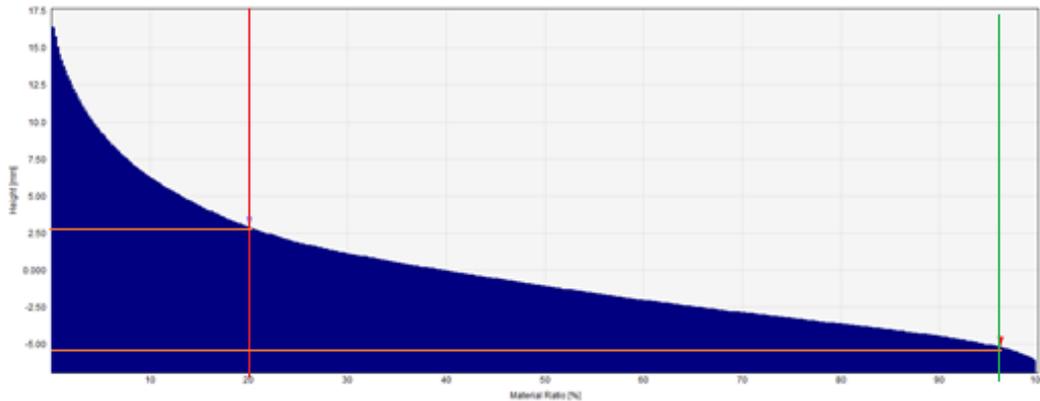


Figura 50: Curva de Abbott en mezclas abiertas.
Fuente: Esparza, S.

Los valores expresados en la tabla 25, son los valores de los parámetros expuestos en la norma ISO 25178-2, para asfaltos de mezcla densa o cerrada.

En este caso se observa valores de kurtosis (véase 2.5.1.1) en su gran mayoría están sobre tres, valor que indica gran presencia de picos poco pronunciados y a su vez pocos valles, o valles largos, que se demuestra con los valores pequeños de la longitud de correlación “Sal”, figura 50; así mismo una asimetría con cola positiva.

La curva de Abbott, en el caso de mezclas cerradas, figura 52, muestra picos extremos en alrededor del 12.5%, pero se aprecia que existen menos picos extremos o a su vez la curva se ve que tiene una tendencia logarítmica. El rango intermedio del material se observa que esta alrededor del 78.5% sin tendencia a subir rápidamente sino más bien a mantenerse, indicando valles y picos equilibrados, lo que no ocurre en una muestra de mezcla abierta o porosa; y el 9% se encuentra los valles extremos, observándose una curva logarítmica hacia abajo, hasta completar el 100% del material.

Apreciando las dos curvas de Abbott, (mezclas porosas y mezclas densas), se observa también la diferencia existente entre estos tipos de mezclas, véase la gran cantidad de picos en la mezcla porosa y a su vez pocos picos extremos en la densa, así mismo se observa la tendencia de picos en la región central de la curva en las mezclas porosas, en cambio en las mezclas densas, se observa cierto equilibrio en este sector.

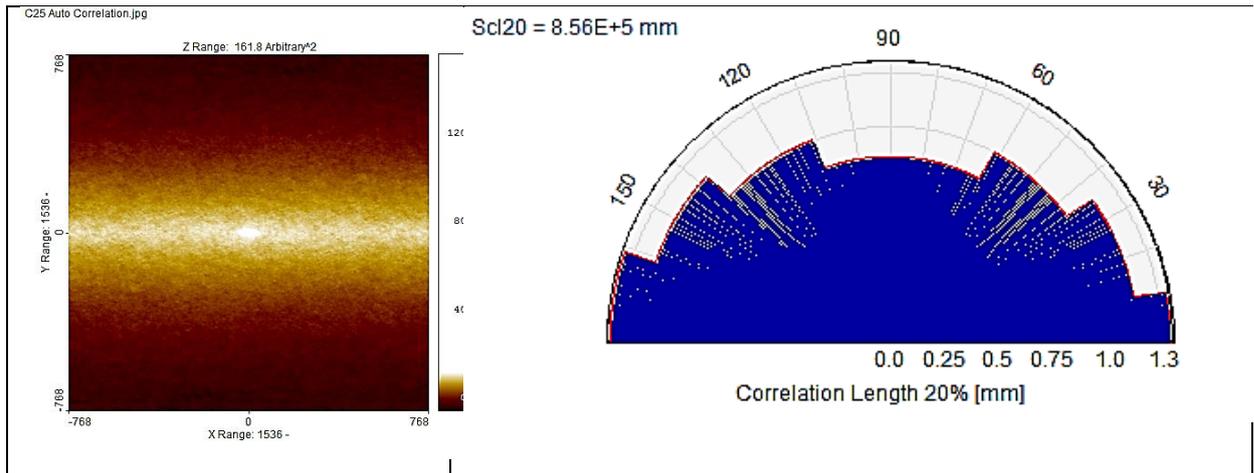


Figura 51: Longitud de correlación en mezclas asfálticas densas.
 Fuente: Esparza, S.

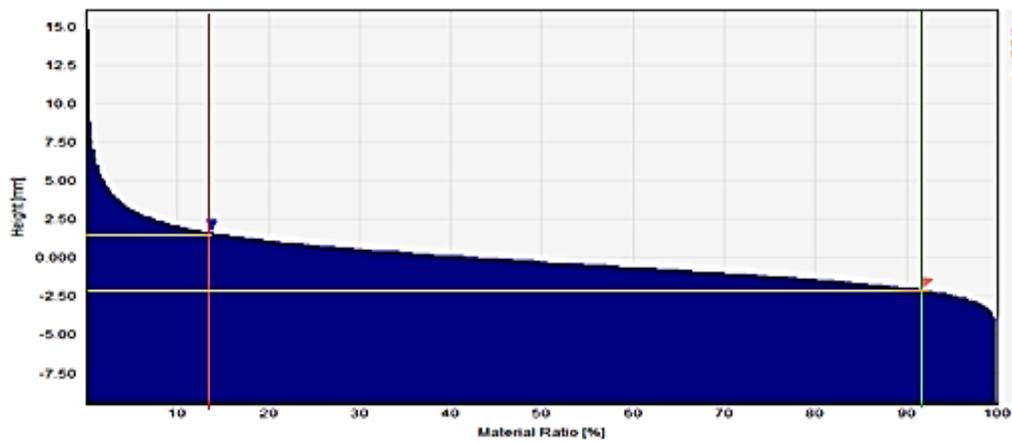


Figura 52: Curva de Abbott en mezclas asfálticas densas.
 Fuente: Esparza, S.

CAPÍTULO IV

4.1 Conclusiones.

El ensayo del Círculo de arena es la base confiable para determinar la textura superficial de un pavimento, ensayo rápido y de fácil ejecución.

Mediante la utilización del software SPIP™ se consigue relacionar estadísticamente los resultados obtenidos del programa y del ensayo del Círculo de Arena, para determinar la textura superficial de pavimentos asfálticos densos y abiertos.

Fabricando en laboratorio losetas experimentales de mezclas asfálticas drenantes o porosos se establece la textura superficial de estas, mediante el uso del ensayo del círculo de arena. Utilizando el software SPIP™, con sus aplicaciones de medida de Partículas y Poros, además con los parámetros de Metrología Superficial. Encontrándose que los valores expresados por el programa para la textura superficial de un pavimento drenante son equivalentes o iguales a los datos del ensayo del círculo de arena, $R^2= 0.9156$, manejando el procedimiento de medida de partículas y poros. No se puede concluir que sucede lo mismo para el caso de los parámetros de metrología superficial, que no se los puede comparar siquiera con los datos del ensayo.

Por lo tanto en lo que respecta a mezclas asfálticas abiertas o porosas se concluye que los resultados que se obtenga mediante el uso de imágenes procesadas en el software SPIP™, método de medición de partículas y poros, son iguales a los que se obtiene con el ensayo del Círculo de Arena

Observando las mezclas asfálticas drenantes con variaciones en porcentaje al peso del polímero SBS, se mide la textura superficial, con lo que se concluye que, mientras mayor sea el porcentaje de polímero al peso menor será el valor de la textura superficial en los pavimentos porosos.

En lo que concierne a mezclas asfálticas cerradas o densas, como conclusión principal al medir la textura superficial mediante el ensayo del círculo de arena y el software SPIP™, utilizando el parámetro Sa de Metrología Superficial, se puede tomar estos datos como valores de textura superficial realizando un ajuste al valor obtenido del procedimiento, multiplicando los valores por 0.33, con un $R^2= 0.4925$.

El uso del software SPIP™, evita que se realice o se aplique, el ensayo del círculo de arena, tal como se lo demuestra en la presente investigación, para lograr este objetivo es necesario captar las imágenes desde una altura de 75 cm evitando los rayos solares.

Con este procedimiento se ahorra tiempo al realizar varios ensayos del círculo de arena en una vía y con la solo utilización de una fotografía tener la textura superficial de un pavimento de mezcla asfáltica densa o de mezcla abierta.

4.2 Recomendaciones.

Utilizar el método planteado en la presente investigación como un método alternativo al círculo de arena, el mismo que permite encontrar la textura superficial de un pavimento drenante, siguiendo el manual de uso que se encuentra en el anexo.

Para el caso de pavimentos con mezclas asfálticas densas es recomendable utilizar el parámetro Sa, de metrología superficial, con la respectiva fórmula de ajuste, para obtener la medida equivalente al ensayo del círculo de arena. Para lo cual se presenta la siguiente ecuación:

$$H_{\text{Circulo de arena}} = 0.333 * H_{\text{Rugosidad Sa}}$$

En el caso de tomar las muestras o fotografías, para el análisis en el software, hacerlas de manera que la iluminación sea constante en todas las muestras, si es posible tener un control de lúmenes para que no varíen. Las fotografías así mismo deben tomarse a un ángulo de 90°, ubicando un objeto de referencia lo más cercano a la superficie del pavimento.

Utilizar un pavimento drenante en nuestras vías para aprovechar las ventajas del mismo, así como para incrementar la investigación en nuestro país de este tipo de pavimentos.

Ampliar la investigación o realizarla utilizando pavimentos hidráulicos. Ya no solo en laboratorio sino en alguna de las vías de la localidad.

Comparar los resultados utilizando el ensayo del péndulo británico, como dato de comprobación, ya no con el ensayo del círculo de arena.

Ampliar el estudio a la medida del ángulo de fricción de los pavimentos, utilizando las amplias ventajas del software SPIP™.

BIBLIOGRAFIA

- AIPCR: Comité Técnico AIPCR de Características Superficiales C.1. (1995). *Experimento Internacional AIPCR de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento*. Asociación Mundial de la Carretera.
- Asociación Técnica de Carreteras, Comité Español de la AIPCR. (2002). *Diccionario Técnico Vial de la AIPCR* (7ma. ed.). Madrid: Asociación Técnica de Carreteras.
- Ayala , M., & Juárez, I. (2010). *DISEÑO DE MEZCLA DRENANTE CON ASFALTO MODIFICADO DISPONIBLE EN EL SALVADOR*. Universidad del Salvador.
- Blateyron, F. (2006). New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology. *Quality Magazine*, 7. Obtenido de <http://www.qualitymag.com/articles/85037-new-3d-parameters-and-filtration-techniques-for-surface-metrology>
- Blateyron, F. (2013). The Areal Feature Parameters. En R. Leach, *Characterisation of Areal Surface Texture* (págs. 45-65). Teddington: Springer.
- Blateyron, F. (2013). The Areal Field Parameters. En R. Leach, *Characterisation of Areal Surface Texture* (págs. 15-44). Teddington: Springer.
- Blunt, L., & Jiang, X. (Edits.). (2003). *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography*. Reino Unido: Kogan Page Science,.
- Castro, J., de Solminihaç , H., Videla, C., & Fernández, B. (2009). Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 271-284.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (1987). *Medida de la Textura Superficial de un Pavimento por el Método del Círculo de Arena 335/87*. CEDEX.
- Crespo del Río, R. (1999). *Calidad ante la Rodadura*. Barcelona.
- de Solminihaç, H. (2002). Pavimentos Porosos de Hormigón: Una Opción para Mitigar los Efectos de las Aguas Lluvias. *BIT*, 35-38.

- Dunford, A. (2013). Road Surfaces. En R. Leach, *Characterisation of Areal Surface Texture* (págs. 337-348). Teddington: Springer.
- Elunai, R., Chandran, V., & Gallagher, E. (2011). Asphalt Concrete Surfaces Macrotecture Asphalt Concrete Surfaces Macrotecture. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 12(03), 857-869.
- Giusca, C. L., & Leach, R. (2013). Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: part 3. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 6.
- Granda, F. (2012). *Estudio del Comportamiento Reológico del Asfalto Producido en la Refinería Estatal de Esmeraldas*. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Image Metrology. (2013). Scanning Probe Image Processor, SPIP. Dinamarca. Obtenido de <http://www.imagemet.com/>
- ISO. (2012). *ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters* (1ra. ed.). Suiza.
- Leach, R. (Ed.). (2013). *Characterisation of Areal Surface Texture*. Teddington: Springer.
- Maila, M. (2013). *Comportamiento de una Mezcla Asfáltica Modificada con Polímero Etileno-Vinil-Acetato (EVA)*. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Mathia, T. G., Pawlus, P., & Wiczorowski, M. (2011). Recent trends in surface metrology. *WEAR* 271, 494-508.
- McGarigal, K., Tagil, S., & Cushman, S. (2009). Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecol* 24, 433-450.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES*. Quito.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Paraguay. (2011). *Manual de Carreteras* (Vol. 2). Asunción.

- Miró Recasens, J. R. (1994). *Métodología para la Caracterización de Ligantes Asfálticos Mediante el Empleo del Ensayo Cantabro*. ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, Barcelona.
- Miró Recasens, J. R., & Jiménez Pérez, F. (s.f.). *NUEVOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES Y MEZCLAS ASFALTICAS*. Barcelona.
- Miró Recasens, R. (2006). *NUEVAS MEZCLAS PARA CAPAS DE RODADURA Y SU INFLUENCIA EN EL CONFORT (RUIDO) Y LA SEGURIDAD*. Universidad Pólitecnica de Cataluña, Zaragoza.
- Montejo Fonseca , A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (2da. ed.). Bogotá: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.
- Montejo Fonseca, A. (2006). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, Tomo I y Tomo II*. Santa Fé de Bogota: Universidad Católica de Colombia.
- Montgomery, D. C., & Runger , G. C. (2002). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (3ra. ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2004). *Probabilidad y Estadística Aplicada a la Ingeniería* (2da. ed.). México DF: Editorial LIMUSA S.A. de CV.
- Niño, G. A., & Ramírez, A. (2009). *Mejoramiento de la Adherencia Llanta-Camino Empleando Microaglomerados*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Rebollo, O., González, R., & Botasso, G. (2005). DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE LIGANTE OPTIMO, EN MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS. *Infraestructura Vial*, 7(24), 29-34. Obtenido de http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com_content&view=article&id=234&Itemid=296
- Rodríguez Hernández, J. (2008). *ESTUDIO, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SECCIONES PERMEABLES DE FIRMES PARA VÍAS URBANAS CON UN COMPORTAMIENTO ADECUADO FRENTE A LA COLMATACIÓN Y CON LA CAPACIDAD PORTANTE NECESARIA PARA SOPORTAR TRÁFICOS LIGEROS*. Universidad de Cantabria, Santander.

- Sandoval de León , P. (2000). *Consideraciones Sobre la Aplicación del Índice de Fricción Internacional (IFI) en las Condiciones de Seguridad en Carreteras*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Shenghuai, W., Fenghua, X., Yurong, C., & Tiebang, X. (2011). The MOTIF Evaluation Method and its Region Combination Algorithm for Surface Texture. *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 1811-1815.
- Sosa, J. C. (2012). *ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL ASFALTO PRODUCIDO EN LA REFINERÍA ESTATAL DE ESMERALDAS*. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Sosa, W., Sierra, M., Parra Vargas, C., & Salcedo, L. (2006). ANALISIS DE RUGOSIDAD POR MICROSCOPIA DE FUERZA ATOMICA (AFM) Y SOFTWARE SPIP APLICADO A SUPERFICIES VITREAS. *Revista Colombiana de Física*, 38(2), 826-829.
- Vincent, L., & Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6), 583-598.
- Webster, A. (1996). *Estadística Aplicada para Administración y Economía* (2da. ed.). España: IRWIN.
- Whitehouse, D. J. (1997). Surface Metrology. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 955-972.
- Whitehouse, D. J. (2011). *Handbook of surface and nanometrology* (2da. ed.). Boca Raton, Florida: TAYLOR & FRANCIS Group.

ANEXOS

Anexo A

Manual de uso del programa SPIP.

El siguiente manual de uso del programa SPIP, se realiza para encontrar los resultados de la textura superficial por el método de medición de partículas y poros. Por lo tanto a continuación se describe cómo utilizar el software para obtener la textura superficial de un pavimento drenante elaborado con diferentes cantidades de polímero SBS en el ligante asfáltico:

1. Para iniciar en la pantalla de inicio del programa que nos muestra diferentes opciones se da un clic en “Particle & Pore Analysis”. para abrir las opciones del análisis de partículas y poros. Figura A1.

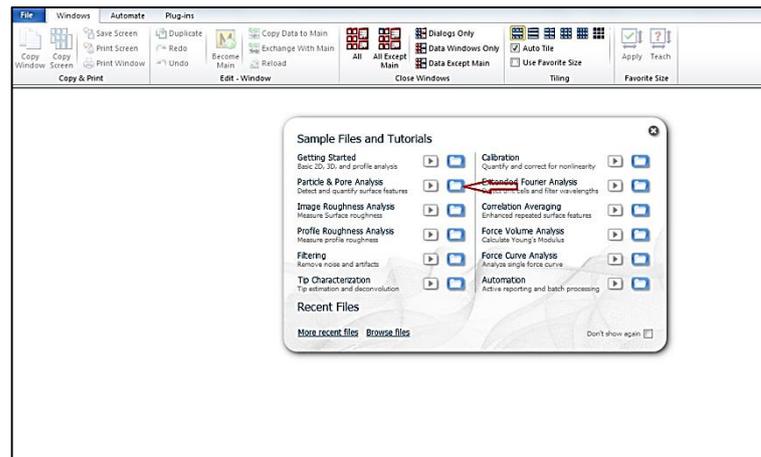


Figura A1: Inicio del programa.
Fuente: Esparza, S.

2. A continuación de esto, se abren todas las pestañas para el uso del análisis de partículas y poros además de opciones que permitan modificar la imagen, realizar cambios en color, aplicarle filtros y demás, figura A2. Y por defecto se abre una imagen que el programa tiene como ejemplo, lo cual se puede desactivar.

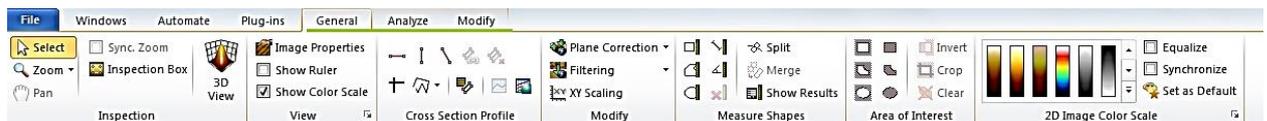


Figura A2: Pestañas para análisis de partículas y poros.
Fuente: Esparza, S.

3. El siguiente paso es, dirigirse a la pestaña “File” en la cual se ubica la opción “Open”, se da un clic en ella, luego de lo cual se abre la ventana para ubicar y abrir el archivo de imagen a procesar en el programa.

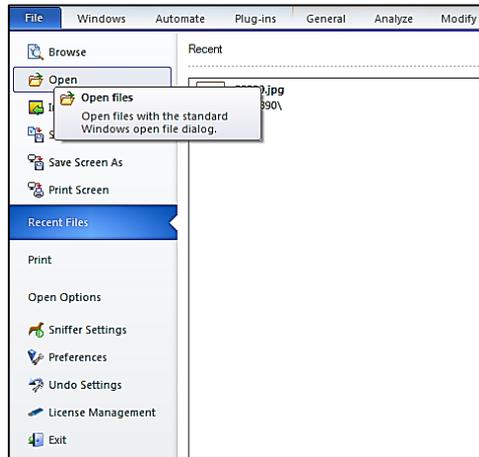


Figura A3: Abrir archivo a procesar.
Fuente: Esparza, S.

4. A continuación: abierto el archivo de imagen en el cual se trabaja se abre la pestaña “Analyze”, dentro de las opciones que tiene esta pestaña se encuentra “Particle and Pore” y se da un clic en ella.



Figura A4: Botón “Particle and Pore”.
Fuente: Esparza, S.

Con lo cual se abre en la parte derecha de la pantalla el siguiente recuadro de opciones.

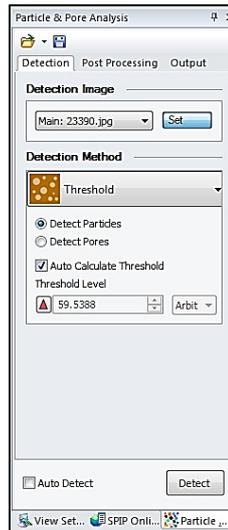


Figura A5: Ventana “*Particle and Pore*”.
Fuente: Esparza, S.

5. Luego, en la opción “*Detection Method*” de las cuatro opciones presentes se escoge “*Watershed - Dispersed Features*”, (Características dispersas de la cuenca), la cual será el método de detección que se utiliza para la caracterización de partículas y poros en la presente investigación.

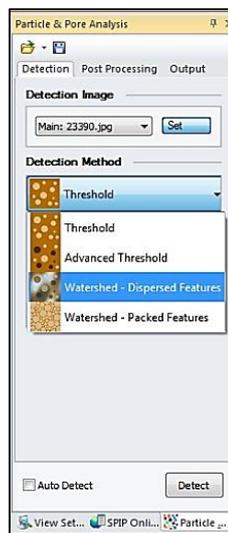


Figura A6: Opción “*Watershed - Dispersed Features*”.
Fuente: Esparza, S.

Es necesario, familiarizarnos con las pestañas que contiene el recuadro “*Particle & Pore Analysis*”, para la opción elegida.

En la pestaña de “*Detection*”, se encuentra la opción de elegir la detección de partículas o poros o ambas a la vez, para el uso actual, se elige solo una opción a la vez, porque es

importante obtener los resultados de los poros y de las partículas por separado; el “*Plateau Range*” (intervalo de meseta) se lo dispone en 0,00; por último, en este pestaña se ubica el filtro con el cual se puede distinguir el tamaño mínimo de las partículas y poros que en este caso es de 4 x 4 píxeles.

En la siguiente pestaña, llamada “Post Processing”, indica las opciones a utilizar como son <Preserve Holes in Shapes> y <Smooth Shape Contours>, las dos opciones se aplican en este caso. Lo mismo sucede con la opción de incluir las formas en el margen. No se aplica ningún parámetro de filtro.

En la pestaña de “Output”, revela las mediciones y los gráficos que se obtienen luego de la detección, las mismas que tienen diferentes disposiciones para una mejor visualización de los datos.

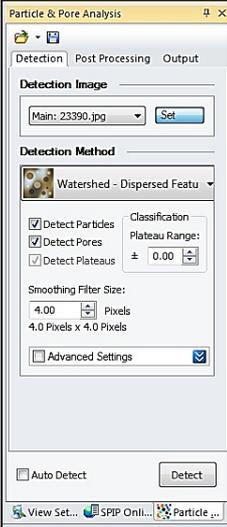
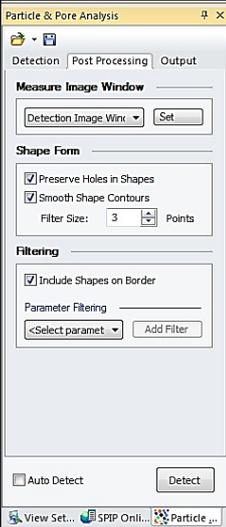
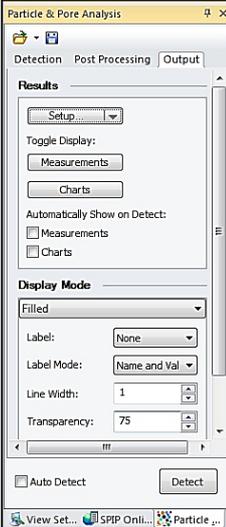
| | | |
|--|--|--|
|  |  |  |
| <p style="text-align: center;">Detección</p> | <p style="text-align: center;">Publicación del procesamiento</p> | <p style="text-align: center;">Salida de datos</p> |

Figura A7: Pestañas del recuadro “*Particle & Pore Analysis*”.
Fuente: Esparza, S.

- Posteriormente, se ejecuta el programa dando un clic en “*Detect*”, para que se dé la corrida al programa.

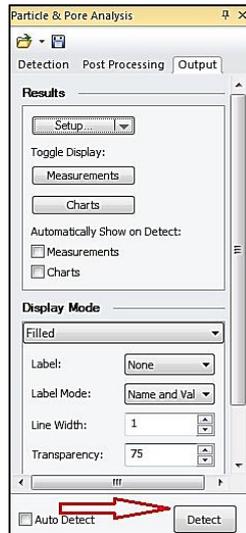


Figura A8: Corrida del programa SPIPTM.
Fuente: Esparza, S.

7. Le toma unos segundos al programa realizar la detección de las partículas o de los poros, según sea la opción elegida en la pestaña “*Detection*”. Seguido a esto se abre una pestaña que muestra los resultados obtenidos de la corrida al programa.

Shape Measurements: 23390.jpg

Setup | Automatic

| | |
|----------------------------------|------------------------------|
| Coverage | 16.0895 % |
| Shape count | 18788 |
| Mode normalized shape count | 42304 |
| Detection | |
| Measure Image | F:\23390\23390.jpg |
| Detection Image | F:\23390\23390.jpg |
| Detection time | 22/04/2014 11:27:42 a.m. |
| Detection method | Watershed Dispersed Segments |
| Shape type | Particles, Plateaus |
| Plateau range | 0.00 |
| Smoother filter size | 4.00 Pixels |
| Number of detail levels | 1 |
| Slope noise reduction | 10 % |
| Slope image threshold percentile | 50.00 % |
| Merge Adjoining Shapes | No |
| Post Processing | |
| Preserve Holes in Shapes | Yes |
| Smooth shape contours | Yes |
| Filter size | 3 |
| Include shapes on border | Yes |

Shape Measurements: 23390.jpg

Setup | Automatic

| ID | Type | Diameter [Pixels] | Area [Pixels ²] | Z Minimum [Arbitrary] | Z Maximum [Arbitrary] | Z Range [Arbitrary] | Aspect Ratio |
|----|----------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| 1 | Particle | 5.143451 | 20.777778 | 75.797981 | 153.696976 | 77.898994 | 1.083333 |
| 2 | Particle | 4.606589 | 16.666667 | 132.282822 | 215.707077 | 83.424255 | 1.304169 |
| 3 | Particle | 4.606589 | 16.666667 | 147.414139 | 220.484848 | 73.070709 | 1.206949 |
| 4 | Particle | 3.321858 | 8.666667 | 103.737373 | 165.737381 | 62.000008 | 1.333333 |
| 5 | Particle | 3.124340 | 7.666667 | 95.363640 | 146.656570 | 51.292931 | 1.000000 |
| 6 | Particle | 4.889643 | 18.777778 | 158.000000 | 254.888885 | 96.888885 | 1.483430 |
| 7 | Particle | 2.913462 | 6.666667 | 34.565655 | 74.565659 | 40.000004 | 1.166667 |
| 8 | Particle | 4.337701 | 14.777778 | 32.525253 | 122.151512 | 89.626259 | 1.865218 |
| 9 | Particle | 3.723461 | 10.888889 | 32.535355 | 60.535355 | 28.000000 | 1.509704 |
| 10 | Particle | 5.252319 | 21.666667 | 153.525253 | 221.000000 | 67.474747 | 1.280978 |
| 11 | Particle | 5.935174 | 27.666667 | 172.474747 | 254.565657 | 82.080811 | 1.819447 |
| 12 | Particle | 5.851153 | 26.888889 | 103.424240 | 227.313126 | 123.888885 | 1.971783 |
| 13 | Particle | 2.913462 | 6.666667 | 96.646461 | 152.868683 | 56.222221 | 1.166667 |
| 14 | Particle | 2.193175 | 3.777778 | 45.939392 | 60.939392 | 15.000000 | 1.444444 |
| 15 | Particle | 2.961622 | 6.888889 | 157.434341 | 187.696976 | 30.262634 | 1.360479 |
| 16 | Particle | 5.385310 | 22.777778 | 127.000000 | 239.080811 | 112.080811 | 1.862295 |
| 17 | Particle | 2.712286 | 5.777778 | 169.848480 | 224.696976 | 54.848495 | 1.753571 |

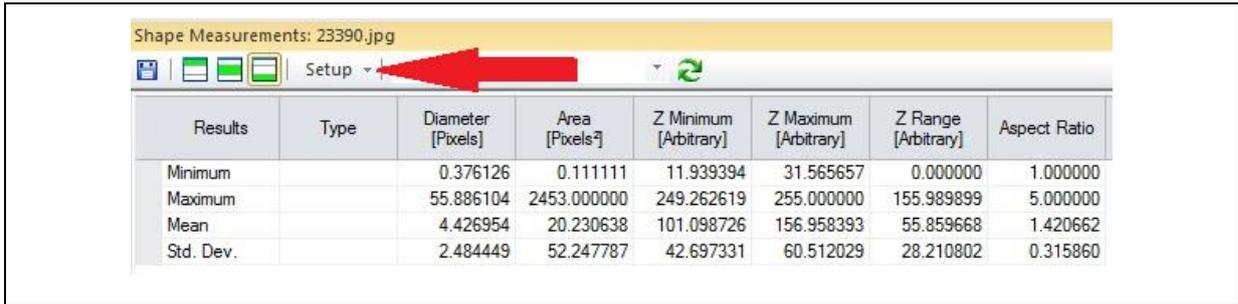


Figura A9: Resultados del programa SPIP™.
Fuente: Esparza, S.

Los resultados que arroja la corrida del programa vienen dados en tres ventanas; en la primera nos da las especificaciones de la imagen y las opciones escogidas en los recuadros de “*Detection*” y de “*Post Processing*”. En la segunda ventana da los resultados de las partículas o poros, su diámetro, área, volumen, etc...lo que se haya escogido para que arroje el programa. Mientras que la tercera ventana da los valores significativos o de interés los cuales se pueden escoger de una lista en la opción “*Setup*”, es importante escoger la opción sumatoria, indicada en el último recuadro de la Figura A9.

También, en la imagen que se procesó, el programa nos indica los poros y las partículas con los colores representados en la segunda ventana. Figura A10.

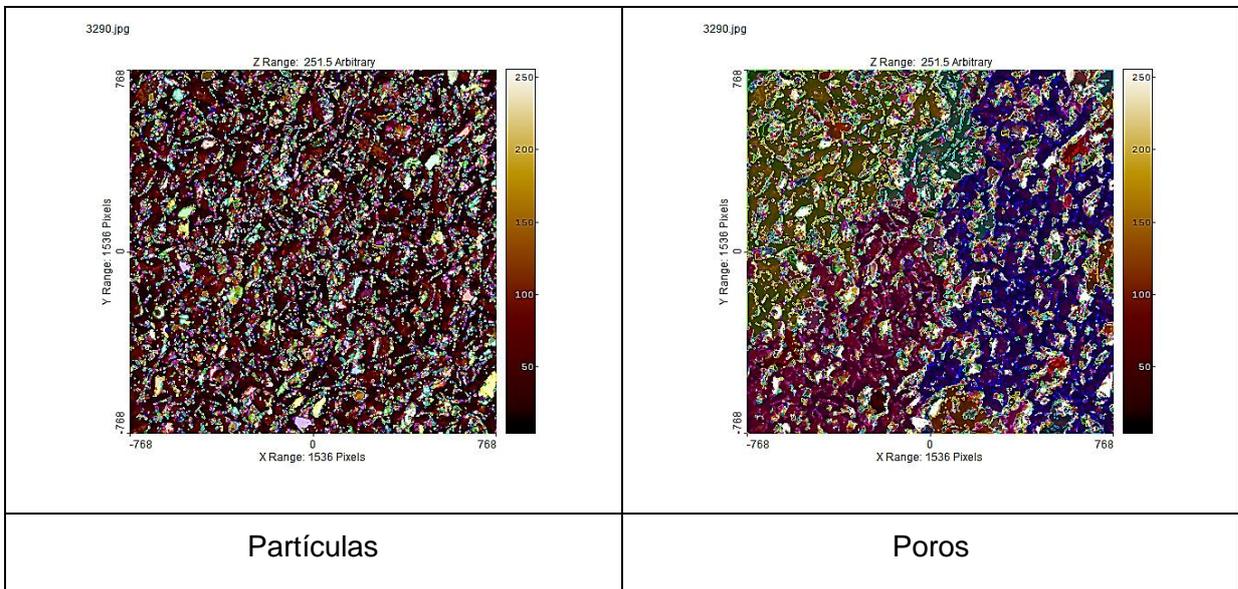


Figura A10: Representación de colores y poros en imagen.
Fuente: Esparza, S.

8. Con los resultados de la corrida es necesario guardar los mismos. El programa por defecto indica guardar los datos en un formato *.grn; pero, es conveniente hacerlo en un formato *.xls el cual es el del Excel en formato 97/2003, para un mejor manejo de

los datos, para lograr esto solo es necesario escribir al final del nombre (.xls), por ejemplo 23390.xls, Figura A11.

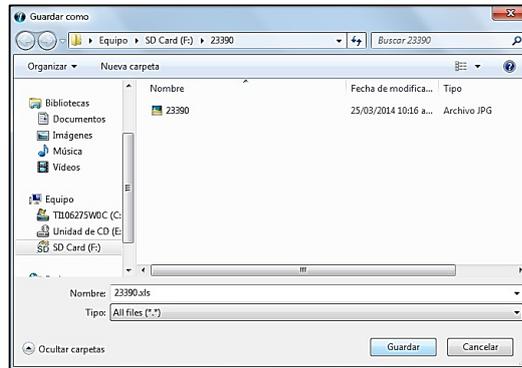


Figura A11: Guardar resultados como un archivo de Excel.
Fuente: Esparza, S.

Después de guardar los datos es conveniente copiar los datos y volverlos a guardar pero esta vez en un formato *.xlsx (Excel 2010). Con el fin de agrupar en una solo archivo de Excel todos los datos, sean de poros y de partículas.

9. Cuando ya se tiene los datos para las partículas y poros, las sumatorias del área y del volumen son las que nos interesan para el cálculo de la textura superficial. Y se procede a hacer los siguientes cálculos:

Tabla A1. Ejemplo de cálculo de la textura superficial utilizando el software SPIPTM.

| | | | | | |
|---------------------|------------------|----------------------|------------------------|--------------------|----------------------|
| Área de poros: | 1817571888889.00 | píxeles ² | Volumen de poros: | 96252519893095.00 | píxeles ³ |
| Área de partículas: | 518009888889.00 | píxeles ² | Volumen de partículas: | 88515334680899.00 | píxeles ³ |
| Área total: | 2335581777778.00 | píxeles ² | Volumen total: | 184767854573994.00 | píxeles ³ |
| | H= | 41.2113679 | píxeles | | |
| | H= | 4.079925422 | mm. | | |

f= 10.101010

Fuente: Esparza, S.

Donde:

Área total = área de poros + área de partículas.

Volumen total = volumen de poros + volumen de partículas.

H (Píxeles) = volumen de poros / área total.

H (textura superficial en mm.) = H (Píxeles) * factor de conversión.

Cabe acentuar que es necesario realizar tres mediciones de este tipo y con ellas obtener un promedio para realizar los análisis. Así mismo para el análisis de las fotografías de las

mezclas asfálticas densas se hizo un único cambio que es en el punto 5, en el cual se escogió el método de detección “Thereshold”.

El factor de conversión, resulta del total de pixeles ocupados en la fotografía por el objeto que se haya utilizado para referenciar, en esta investigación se utilizó un objeto cuadrado de papel de 1 cm por lado. Vale destacar que esta referencia debe estar lo más cercano a la loseta de asfalto para evitar algún tipo de perspectiva. Figura A12.



Figura A12: Referencia para factor de conversión.
Fuente: Esparza, S.