

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La importancia de la conservación del medio ambiente y los avances tecnológicos de nuestro tiempo han obligado a la búsqueda de nuevas formas de construcción de vías de comunicación terrestre (carreteras), pistas y vías de circulación aeroportuaria, así como de calles y avenidas en áreas urbanas. Esta búsqueda ha permitido encontrar nuevas alternativas que ofrece ventajas técnicas y constructivas, a diferencia de las que ofrece los métodos tradicionales; cuyos resultados han impulsado a su utilización en la construcción de pavimentos a nivel mundial.

Uno de los avances importantes, sin duda es la construcción de pavimentos asfálticos en frío, usando emulsiones asfálticas, que resuelven el problema del asfalto en caliente, que restringe su aplicación en zonas que se producen temperaturas bajas y existe el riesgo de injerencia de humedad.

Las emulsiones asfálticas tienen una diversidad de aplicaciones en las construcciones de pavimentos principalmente en proyectos de construcción, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo; los tipos de pavimento en los que se puede utilizar las emulsiones asfálticas, son tratamientos asfálticos superficiales, concreto asfáltico, micropavimento (tema central del presente estudio), parches y rodaduras delgadas, sellos de lechada, estabilización de suelos, etc.

El micropavimento es una mezcla de emulsión asfáltica de rotura controlada modificada con polímeros, agregado 100% triturado, minerales finos, agua y aditivos que, en proporciones apropiadas y debidamente aplicados, constituyen una capa de rodadura uniforme e impermeable que garantiza la conservación de cualquier tipo de vía de tránsito vehicular. Entre sus características principales podemos mencionar que suministra la resistencia necesaria a las fuerzas abrasivas del tránsito vehicular.

La técnica de micropavimento con el uso de emulsiones asfálticas, ofrece ventajas significativas en el proceso constructivo. Muchas obras viales importantes de países

industrializados de Europa, Asia, América del norte y países vecinos, se ejecutan con éxito usando la técnica del micropavimento.

En nuestro país, a pesar de haberse ejecutado algunas obras con este método, es muy poco conocido por instituciones que están involucrados en la construcción de vías (el Servicio Nacional de Caminos, los Servicios Departamentales de Caminos, las empresas constructoras y municipios o alcaldías), sin embargo, se aplicó esta nueva tecnología en los aeropuertos de las ciudades de Santa Cruz, El Alto, y Tarija, en esta última ciudad es donde se aplica por primera vez en calles y avenidas, como también en algunas carreteras de La Paz, Oruro y Santa Cruz.

A partir de ello esta investigación se enfoca en el estudio del micropavimento aplicado a calles y avenidas de la ciudad de Tarija, donde se recoge toda la información necesaria para su evaluación. Esta evaluación se divide en dos ramas, la primera, en analizar la mezcla que fue aplicada, sus componentes, diseño y calidad de mezcla; y la segunda, a partir de ensayos superficiales no destructivos realizados después de la aplicación del micropavimento. Luego se analizan los resultados y se obtienen conclusiones concretas de la investigación, donde se verifica si esta nueva metodología de rehabilitación del empleo de micropavimento es factible y recomendable para el uso en vías urbanas de nuestro medio.

1.2. Situación problémica

A partir de un diagnóstico de las calles y avenidas en la ciudad de Tarija, realizado por la Alcaldía Municipal, observaron varias fallas en la carpeta asfáltica, esto se debe a que no se dio mantenimiento preventivo a las vías, sin embargo, existen técnicas tradicionales para solucionar temporalmente las fallas, como sellar grietas, rellenar hundimientos y ahuellamientos, revestir superficies desgastadas, degradadas, piel de cocodrilo y envejecidas, antes de que el agua infiltre y llegue a las capas inferiores provocando destrucción y desprendimiento de la carpeta asfáltica.

Sin embargo, la Alcaldía Municipal toma una nueva alternativa, la del revestimiento con micropavimento, con la finalidad de sellar superficialmente la carpeta asfáltica deteriorada, para corregir irregularidades y demás fallas.

Pero en nuestro medio, por ser la primera vez que se observa la aplicación de esta técnica, existe la incertidumbre en las expectativas de la calidad, durabilidad, resistencia, impermeabilidad, textura superficial, etc.

Para ello es necesario realizar una evaluación del micropavimento, que permita conocer los resultados característicos de los componentes y diseño teórico de la mezcla, los resultados que verifiquen la aplicación del diseño de la mezcla en obra y los resultados de resistencia y textura final.

Por otra parte, no existe una bibliografía específica que de lineamientos para evaluar cualquier micropavimento, sin embargo, se ve la necesidad de conocer la calidad del micropavimento que fue empleado en nuestro medio, y más aún, saber si su aplicación fue la óptima.

1.2.1. Problema

¿Cómo evaluó el micropavimento aplicado en las vías urbanas de la ciudad de Tarija?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

Tecnologías como el micropavimento, ofrecen soluciones en el rendimiento del pavimento. Sin embargo, se desconoce el resultado que genera su colocado en las calles y avenidas de la ciudad de Tarija. Por lo tanto es necesario acudir a técnicas de evaluación a través del uso de equipos que son accesibles en nuestro medio, como ser en el laboratorio de asfaltos de la U.A.J.M.S. y Quimitec Asfaltos S.R.L. (Santa Cruz).

1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema

El presente proceso de evaluación, se llevó a cabo en las calles y avenidas de la ciudad de Tarija que fueron tratadas con micropavimento, sus ubicaciones son detalladas en la muestra.

Para la evaluación in situ, por la cantidad de calles y avenidas a evaluar, fue necesario realizarlo durante un semestre, haciendo uso de un día por semana, con la finalidad de evadir el tránsito vehicular.

Para la evaluación en laboratorio, fue necesario realizarlo durante otro semestre, porque uno de los laboratorios está ubicado en la ciudad de Warnes – Santa Cruz (Quimitec Asfaltos S.R.L.) y el otro en la ciudad Tarija (laboratorio de asfaltos U.A.J.M.S).

1.3. Justificación

La economía de un país está basada en la movilidad de personas, bienes y servicios a lo largo y ancho del mismo durante las 24 hr del día, los 7 días de la semana y 365 días del año; por dicho motivo el sistema de carreteras debe estar en condiciones óptimas para tener un alto grado de conectividad y eficiencia, desarrollando una economía saludable y competitiva globalmente, porque soluciona:

Seguridad, porque permite corregir la textura superficial del pavimento cuando éste presenta baja resistencia al deslizamiento.

Apariencia y calidad de la superficie, porque corrige deterioros superficiales como pérdida de áridos gruesos y finos, cubre irregularidades y provee una superficie uniforme, aportando valor estético al pavimento.

Corrección de deformaciones, en el caso particular de la microsuperficie puede también ser aplicado para corregir ahuellamiento de hasta 50 mm.

Las emulsiones asfálticas han sido empleadas con una gran amplitud en los países en desarrollo debido a su costo inferior y por ser una mejor alternativa al empleo de las mezclas asfálticas en caliente por ser de carácter ecológico.

Siendo el micropavimento, un tratamiento superficial rápido, de alto rendimiento que mejora las condiciones de tránsito y ayuda al mantenimiento de los pavimentos, indiscutiblemente la implementación de esta mezcla asfáltica en la ciudad de Tarija, y en general en el país, se verá reflejada en una mejor seguridad y eficiencia en el transporte, lo que da como resultado más y mejores beneficios sociales.

Es de gran importancia la realización de esta evaluación ya que la conservación de pavimentos y del medio ambiente, se define como actividades orientadas a brindar y a mantener las carreteras usando tratamientos de bajo costo para extender la vida útil del mismo, mejorando su desempeño y reduciendo las molestias para los usuarios.

El micropavimento ha sido utilizado en aeropuertos de nuestro país, principalmente para corregir irregularidades en pavimentos como alisamientos por exudación, desintegración

y oxidación, y para mejorar las características de fricción, como así también en algunas carreteras de Bolivia.

En la aplicación práctica del micropavimento se puede ver cómo funciona, sus ventajas y desventajas, valorar el mejoramiento de la superficie y ver si se logra subsanar fallas de la estructura y todos los parámetros necesarios para aplicar dicha metodología.

La presente evaluación se enfoca en la etapa nueva del micropavimento, es decir dentro de los primeros 6 meses desde su apertura al tránsito vehicular. Por lo tanto, este estudio en etapa inicial aporta considerablemente a futuras evaluaciones que se deseen realizar, porque permitirá comparar la evolución y comportamiento, en el transcurso del tiempo, que presentará el micropavimento de las calles y avenidas de la ciudad de Tarija, y determinar finalmente ventajas y desventajas es el uso del este tipo micropavimento.

1.4. Objetivos

Los objetivos del presente estudio que se llevaran a cabo son:

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el micropavimento aplicado en las calles y avenidas de la ciudad de Tarija, para conocer el mejoramiento superficial que proporciona.

1.4.2. Objetivos específicos

- Recolectar bibliografía sobre micropavimentos y las técnicas de evaluación superficial.
- Caracterizar en laboratorio los agregados y la emulsión asfáltica y realizar el diseño de la mezcla en frío del micropavimento.
- Muestrear la mezcla de micropavimento durante su aplicación en obra, para verificar en laboratorio el cumplimiento del diseño.
- Realizar ensayos de evaluación superficial con el Péndulo Británico y la mancha de arena para determinar la velocidad máxima segura (método IFI) del micropavimento puesto en obra.
- Determinar la densidad y grado de compactación de la carpeta asfáltica con micropavimento, haciendo uso del Densímetro No Nuclear PQI-380.

- Evaluar los resultados obtenidos con previo tratamiento estadístico descriptivo.
- Establecer conclusiones y recomendaciones según los resultados de la evaluación del micropavimento de las calles y avenidas de la ciudad de Tarija.

1.5. Hipótesis

Ante la existencia de calles y avenidas con micropavimento en la ciudad de Tarija, se podrá evaluar superficialmente determinando la velocidad máxima segura a través del índice de fricción internacional, también determinar la densidad, el grado de compactación y el porcentaje de vacíos de la carpeta rehabilitada y verificar en el diseño de la mezcla de micropavimento en frío.

1.6. Operacionalización de las variables

Se reconocen dos tipos de variables:

1.6.1. Variable independiente

- Velocidad máxima segura con el Índice de Fricción Internacional (IFI)
- Densidad, grado de compactación y % de vacíos de la carpeta micropavimentada.

1.6.2. Variable dependiente

- Diseño de mezcla en frío de micropavimento.

1.7. Identificación del tipo de investigación

La investigación que se presenta es de tipo Exploratoria - Cuantitativa, basada de la siguiente forma:

Investigación exploratoria. Este tipo de investigación se centra en analizar e investigar aspectos concretos de la realidad que aún no han sido analizados en profundidad. Básicamente se trata de una exploración o primer acercamiento que permite que investigaciones posteriores puedan dirigirse a un análisis de la temática tratada.

Por sus características, este tipo de investigación no parte de teorías muy detalladas, sino que trata de encontrar patrones significativos en los datos que deben ser analizados para, a partir de estos resultados, crear las primeras explicaciones completas sobre lo que ocurre.

Investigación cuantitativa. Este tipo de investigación se basa en el estudio y análisis de la realidad a través de diferentes procedimientos basados en la medición. Permite un mayor nivel de control que otros tipos de investigación, siendo posible realizar experimentos y obtener explicaciones contrastadas a partir de hipótesis. Para poder aplicar métodos estadísticos que permitan validar sus resultados, las observaciones recogidas se deben valorar de manera numérica. Sus instrumentos suelen recoger datos cuantitativos los cuales también incluyen la medición sistemática, y se emplea el análisis estadístico como característica resaltante.

1.8. Unidades de estudio y decisión muestral

Las unidades de estudio y decisión muestral son:

1.8.1. Unidad de estudio

- Técnicas de rehabilitación de pavimentos

1.8.2. Población

- Micropavimento

1.8.3. Muestra

Se realizará la evaluación del micropavimento empleado en calles y avenidas de la ciudad de Tarija las cuales han sido micropavimentadas dentro de la Fase I ejecutada por el Gobierno Municipal de la ciudad de Tarija.

Se evalúa un punto por cada cuadra propuesta a continuación:

- Av. Panamericana entre la av. Juan de Dios Mealla y calle S/N (San Jorge II) carril del medio.
- Av. Panamericana entre la av. El Periodista y av. Ing. Renán Justiniano (San Jorge II) carril del medio.
- Av. Panamericana entre la av. Cnel. Carlos Díaz Sossa y av. Camilo Moreno carril del medio.
- Av. Panamericana y la calle 6 de junio carril del medio.

- Av. Jaime Paz Zamora y av. Romero carril doble vía.
- Av. Jaime Paz Zamora entre pje. Serapio Martínez y pje. Suarez carril del medio.
- Av. Jaime Paz Zamora entre calle Gustavo Ruiz y calle España carril del medio.
- Av. Jaime Paz Zamora entre calle Padilla y calle Napoleón Raña carril del medio.
- Av. Víctor Paz Estensoro entre calle Issac Attie y calle Junín carril del medio.
- Av. Víctor Paz Estensoro entre calle Daniel Campos y calle Colón carril del medio.
- Av. Víctor Paz Estensoro entre calle Juan Misael Saracho y calle Campero carril del medio.
- Av. Víctor Paz Estensoro entre rotonda Puente San Martín y calle Sevilla carril derecho.
- Av. Panamericana frente al hotel Los Ceibos.
- Av. Panamericana entre calle La Madrid y calle Domingo Paz.
- Av. Panamericana casi rotonda Posta Municipal.
- Calle Ingavi entre calle Sevilla y calle Ramón Rojas.
- Calle Ramón Rojas entre calle Ingavi y calle La Madrid.
- Calle Ramón Rojas entre calle 15 de abril y calle Virginio Lema.
- Calle Campero y calle Avaroa.
- Calle Alejandro del Carpio entre calle Campero y calle Gral. Trigo.
- Calle Alejandro del Carpio entre calle Daniel Campos y calle Colón.
- Calle Virginio Lema entre calle Colón y calle Daniel Campos.
- Calle Virginio Lema entre calle Gral. Trigo y calle Campero.
- Calle Virginio Lema entre calle Ballivián y calle Ramón Rojas.
- Calle Colón entre av. Víctor Paz Estensoro y calle Avaroa.
- Calle Colón entre calle Avaroa y calle Alejandro del Carpio.
- Calle Daniel Campos entre calle Virginio Lema y calle Alejandro del Carpio.
- Calle Daniel Campos entre calle Avaroa y av. Víctor Paz Estensoro.
- Calle Sucre entre av. Víctor Paz Estensoro y calle Avaroa.

- Calle Sucre entre calle Alejandro del Carpio y calle Virginio Lema.
- Calle Avaroa entre calle Colón y calle Daniel Campos.
- Calle Avaroa entre calle Sucre y calle Gral. Trigo.

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

La técnica de muestreo seleccionado es por conveniencia que es un muestreo no probabilístico y no aleatorio.

El muestreo por conveniencia consiste en seleccionar a los individuos que convienen al investigador para la muestra. Esta conveniencia se produce porque al investigador le resulta más sencillo examinar a estos sujetos, ya sea por proximidad geográfica, por la escasa cantidad de muestra, etc.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

Para realizar la evaluación de la muestra, se aplican intencionalmente los ensayos a realizar, es decir que se emplearán métodos de evaluación no destructivos, en el sitio y en laboratorio.

1.9.1. Métodos a utilizar en la evaluación

Para la evaluación del micropavimento de las calles y avenidas de la ciudad de Tarija, es necesario realizar el estudio por dos métodos.

In situ. Con este método se realizan ensayos in situ al micropavimento una vez puesto en libre tránsito vehicular, también se determina la calidad de textura y densidad.

En laboratorio. Con este método se realizan ensayos en laboratorio de caracterización y diseño a partir de un muestreo por separado de los componentes de la mezcla del micropavimento. Por otra parte, a partir de un muestreo in situ de la mezcla de micropavimento, se realiza una evaluación de calidad en el laboratorio para determinar si cumple con el diseño propuesto por la empresa, según normas.

1.9.2. Técnicas a utilizar en la evaluación

En el sitio, después del extendido de la mezcla de micropavimento en las calles y avenidas de la ciudad de Tarija y poner a disponibilidad de tránsito vehicular, aplican las siguientes técnicas de evaluación:

Péndulo de fricción. El procedimiento tiene por objeto obtener un coeficiente de resistencia al deslizamiento (C.D.R) que, manteniendo una correlación con el coeficiente físico de rozamiento, valore las características antideslizantes de la superficie de un pavimento. Los resultados obtenidos mediante este ensayo no son necesariamente proporcionales o correlativos con medidas de rozamiento hechas con otros equipos o procedimientos. Es método permite determinar la micro textura.

Mancha de arena. es una medida de textura superficial, más propiamente de la macro textura. El resultado del ensayo se expresa en mm y representa la profundidad media de los huecos rellenos por la arena normalizada y se la denomina MTD (profundidad media de textura).

IFI. Se puede describir como una escala referencial, de aplicación internacional, de la fricción y de la textura de un pavimento. La textura es la geometría más fina del perfil longitudinal de la carretera. Según la definición de la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras) corresponde a las irregularidades cuya longitud de onda esta entre 0 m y 0,5 m. A estas longitudes de onda les corresponden amplitudes que suelen variar entre 0 y 20 mm. El valor IFI, se calcula a partir de los datos que proporcionan el Péndulo de fricción y la Mancha de arena.

Densidad no nuclear. Este método consiste en hacer uso de un densímetro no nuclear PQI380, el mismo que además de determinar la densidad, también determina el grado de compactación y el porcentaje de vacíos, datos muy importantes para determinar la calidad y resistencia del micropavimento.

En el laboratorio, a partir de un muestreo de los materiales empleados en la mezcla de micropavimento, se aplicaron los siguientes ensayos:

Caracterización de agregados. Este método abarca muchos ensayos para conocer las características físico-mecánicas de los componentes de la mezcla asfáltica, roca triturada y filler, los ensayos de caracterización son: granulometría, peso unitario, peso específico, desgaste de los ángeles, equivalente de arena, durabilidad por sulfatos y azul de metileno.

Caracterización del ligante asfáltico. Este método consiste en determinar las características físico-mecánicas bajo influencia de la temperatura, de la emulsión asfáltica modificada con polímero de rotura rápida para mezclas en frío. Los ensayos de caracterización son: viscosidad Saybolt Furol, tamizado por la malla N°20, residuo por evaporación, sedimentación, carga de partículas, pH, ensayos al residuo como ser penetración, viscosidad Brookfield y recuperación elástica.

Ensayos a la mezcla de micropavimento. Para conocer la calidad en sí de la mezcla del micropavimento, es necesario realizar ensayos previos, como ser los ensayos de abrasión húmeda (WTAT) y rueda cargada (LWT), que permiten determinar el contenido óptimo de ligante asfáltico.

Por otra parte, con la muestra que se extrae en obra, se puede evaluar si la mezcla de micropavimento cumple con la calidad de diseño, con el equipo centrífugo, se determina el contenido de ligante asfáltico residual de la muestra y con el sobrante se realizan ensayos de granulometría y se verifican el cumplimiento con las especificaciones de norma y diseño.

1.10. Procesamiento de la información

A partir del relevamiento de datos por medio de los métodos y técnicas de evaluación planteadas, se procede a realizar un procesamiento de la información adquirida.

Con la información que nos proporcionan los ensayos de laboratorio, se realizó una evaluación de las características de los componentes de una mezcla de micropavimento y el cumplimiento de diseño y calidad del mismo.

Con la información que nos proporcionan los ensayos en el lugar o in situ, se realiza una evaluación del I.F.I. (índice de fricción internacional) con los equipos péndulo británico y mancha de arena, usando el modelo P.I.A.R.C (asociación internacional permanente de

congresos de carreteras), propuesto por el Comité Técnico de Características Superficiales en el XVIII congreso mundial de carreteras (Bruselas 1987). También se verifica la calidad de resistencia a través de los ensayos de densidad, grado de compactación y porcentaje de vacíos, con el equipo densímetro PQI 380.

Toda esta información está plasmada en planillas de respaldos, con cuyos valores se verifican los resultados a través de tablas y gráficos, que estén acorde a las especificaciones de normas tanto de diseño como de acabado en obra. Con esta información se puede apreciar y evaluar la calidad en la que se encuentra el micropavimento en las vías urbanas de la ciudad de Tarija.

Finalmente, con los valores se realiza un análisis estadístico para validar a través de la estadística los resultados obtenidos.

1.11. Alcance de la investigación

Este estudio esencialmente pretende explicar sobre las características generales y usos del micropavimento, particularmente enfocada a la evaluación de los componentes, el diseño y su extendido de la mezcla del micropavimento en las calles y avenidas de la ciudad de Tarija.

Se analizan las propiedades específicas, tipos y usos de asfaltos, así como también los diferentes ensayos de laboratorio llegando a tener un conocimiento amplio para el uso correcto del mismo, de esta manera evaluar sus propiedades de diseño.

Se determinan las condiciones de diseño de las emulsiones asfálticas en frío y caliente sus aplicaciones y usos, así también las especificaciones y pruebas para las mismas, llegando a seleccionar el tipo de emulsión apropiada. También se estudia el comportamiento de la mezcla en frío, en base a los ensayos de laboratorio.

Se estudia acerca del mantenimiento y rehabilitación de pavimentos asfálticos, la importancia y procedimientos con actividades específicas.

Se investiga los fundamentos para implementar la nueva técnica, además se tendrá los usos y aplicaciones del micropavimento dentro de un marco referencial.

Se hicieron diferentes consideraciones para la aplicación básica de la mezcla así, por ejemplo, limitaciones, tolerancias, equipo, fallas, control de calidad. A través las pruebas y ensayos demostrando que esta nueva técnica tiene muchas ventajas.

Se observa el proceso de construcción del micropavimento para así tener mayor información en la parte constructiva del mismo.

Económicamente se obtienen parámetros que podrán ser utilizados para justificar que es una de las mejores alternativas para el mejoramiento de calles y avenidas en mal estado.

CAPÍTULO II

MICROPAVIMENTO

CAPÍTULO II

MICROPAVIMENTO

2.1. Introducción

La tecnología del micropavimento tiene muchos años de investigación y difusión en todo el mundo y algunos países de Latinoamérica, gracias a políticas tanto estatales como privadas que apuestan por técnicas novedosas que significan menores costos y que ofrezcan mayores beneficios respecto a los métodos tradicionales.

Ríos (2005) afirma que a medida que más y más pavimentos alcanzan su vida útil de servicio, los ingenieros viales se muestran más preocupados por encontrar técnicas apropiadas de rehabilitación de superficies que ayuden a prolongar su vida útil con una relación en costo-beneficio óptima. Una tecnología prometedora, denominada Micropavimento viene siendo aplicada en diversos países del mundo como técnica de rehabilitación y mantenimiento de superficies desde 1980. Cuando es diseñada y aplicada apropiadamente, el micropavimento se ha comportado bien al mejorar las características de fricción superficial y la recuperación de ahuellamientos por neumáticos, bajo variadas condiciones de tráfico y clima. Es nuestra función como ingeniero vial difundir nuevas técnicas de rehabilitación que se adapten a nuestro país, no nos quedemos con lo tradicional, ya que ello nos permite tener mayores opciones frente a un problema de rehabilitación o mantenimiento de una vía específica.

Dávila y Urdaneta (2001), a través de su tesis de investigación dan a conocer las emulsiones asfálticas, que están tomando un lugar muy importante en la construcción de carreteras y aeropuertos en la mayoría de los países, ya que se trata de eliminar el empleo de rebajados asfálticos por ser solventes caros y ecológicamente contaminantes al ambiente. El mortero asfáltico consiste en una mezcla de materiales pétreos, emulsión asfáltica, agua, aditivos y fillers, que proporcionan una mezcla homogénea la cual se aplica sobre la superficie de un pavimento desgastado, oxidado y con pequeñas grietas, es una capa con textura rugosa, resistente, antideslizante y perfectamente adherida sobre la superficie.

Cano y Gutiérrez (2014), en su tesis de grado recomienda que no es suficiente con evaluar la calidad de los agregados para obtener una mezcla de Micropavimento resistente,

duradera y que cumpla con las solicitudes, también es importante evaluar la afinidad de estos agregados con la emulsión.

2.2. Antecedentes

El Micropavimento ha sido diseñado inicialmente en Europa, donde es generalmente conocido como “micro concreto asfáltico”. A mediados de 1970, Screg Route, una compañía francesa, diseña concreto asfáltico con el nombre de Seal Gum, que luego fue mejorado por una compañía alemana con el nombre de Rasching. Estos comercializaron el producto en los Estados Unidos con el nombre de “Ralumac” durante los años iniciales de la década del 80 posteriormente en esta década la firma española Elsamex, desarrolló y comercializó el micro concreto asfáltico en EUA, bajo el nombre de macro Seal.

El micropavimento fue primero introducido en Estados Unidos en el año 1980 en Kansas. Desde entonces muchos estados y agencias locales del mismo país usaron este tratamiento para corregir ciertas condiciones en el pavimento en carreteras de medio y alto volumen de tráfico.

El micropavimento se lleva implementado en nuestro país desde el año 1995, el Ejército Boliviano a través del Comando de Ingeniería empleó, lo que intentó ser, micropavimento en la carretera asfaltada Tiquina-Copacabana-Kasini, logrando reducir costos y aumentar rendimientos comparado con el método tradicional de asfaltado. Otros trabajos importantes de pavimentación con aplicación de micropavimento, se ejecutaron en algunos barrios de la ciudad de Santa Cruz, cuyos resultados se enmarcan dentro de lo previsto.

Por dichos antecedentes, el municipio de Cochabamba vio conveniente recarpetar pavimentos deteriorados en el casco viejo de la ciudad, y para tener seguridad de esta técnica de tratamiento superficial para mantenimiento de pavimentos asfálticos deteriorados, optó por aplicar primero en 50000 m², de un total de 250000 m² contemplados en el proyecto de recarpetados de vías en el casco viejo de la ciudad Cochabamba. Este trabajo se ha ejecutado desde el mes de mayo de 1998, con resultados variados, que dependen de las condiciones iniciales de los pavimentos deteriorados.

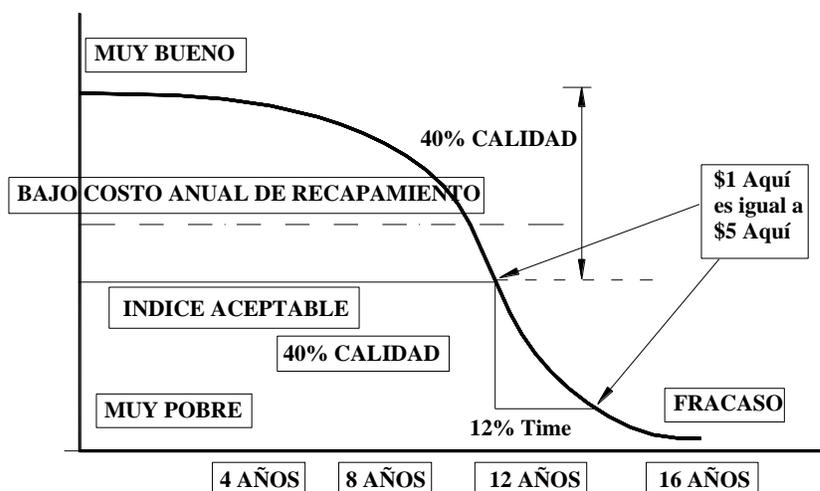
2.3. Importancia del micropavimento

El incremento del tráfico y la carga transportada, aumenta las responsabilidades de los ingenieros de caminos en cuanto a la seguridad de los usuarios; por tanto, los cuidados y mantenimiento de los pavimentos deben ser redoblados, para seguir ofreciendo un servicio óptimo a los usuarios.

Gran parte de los accidentes que ocurren en un camino o vía urbana, podrían ser evitados si las condiciones de resistencia a la fricción de los caminos, fuesen mejorados.

La manera más económica de restablecer sus condiciones originales de macro textura de la capa rodamiento y prolongar su vida útil de un pavimento que preserva su capacidad estructural, es a través de las técnicas de tratamientos superficiales, como el mortero asfáltico y el micropavimento.

Figura 2.1. Curva aproximada en deterioro del camino



Fuente: Departamento Nacional de Infra-Estructura de Transportes. Brasil, 2005.

En la figura 2.1 se muestra una curva de deterioro que indica ese mantenimiento oportuno que es la mejor forma de mantener el periodo de vida útil del camino, y del pavimento asegurándose así una efectividad al costo.

El desenvolvimiento de las emulsiones asfálticas catiónicas a partir de la década del 60, trajo ventajas indiscutibles para las técnicas del tratamiento superficiales, principalmente por la facilidad de aplicación, bajos costos de transporte y aplicación, buen

desenvolvimiento y adhesividad del ligante con los agregados húmedos, también como una posibilidad de combinar grandes volúmenes de producción con poco riesgo de polución atmosférica.

La inversión que se realiza en la red de calles, aún en ciudades pequeñas, es grande. En el pasado, era común planificar las calles sin ningún tipo de mantenimiento, hasta que estas necesitarán la reconstrucción.

Por otro lado, la mayor parte del presupuesto para la reconstrucción de calles podría desaparecer dentro de las próximas dos décadas.

En la presente investigación, la situación ha cambiado, ya que un mantenimiento preventivo llevado a cabo con tecnología eficiente, como lo es el mortero asfáltico, puede prolongar significativamente la vida del pavimento a un bajo costo.

El mortero asfáltico es una técnica que ha sido desarrollada paulatinamente desde 1920. alrededor de 1960, Akzo Nobel se convirtió en el pionero en el uso de sistemas catiónicos de rompimiento rápido y también desarrollaron en su planta de Texas, la primera máquina de mortero asfáltico que es realmente práctica. Esto significó una rápida expansión en el uso del mortero asfáltico.

El mortero asfáltico se convirtió entonces en una herramienta de mantenimiento muy importante, aun cuando este se aplicaba normalmente en capas finas y cuando las pruebas y métodos habían sido pobremente desarrollados.

El año 1983, o sea hace 17 años, la tecnología de sellos asfálticos, alcanzó su siguiente nivel con el desarrollo del micropavimento, al que se considera como el medio hermano del mortero asfáltico.

Las propiedades de rompimiento rápido, fueron entonces combinadas con el uso de modificadores poliméricos en el diseño de mezclas apropiadas, así como con nuevas especificaciones más estrictas, nuevo equipo sofisticado y la habilidad de desarrollar nivelaciones en la recuperación de huellas por deformación de pavimentos.

El uso de un mortero asfáltico convencional, no solo ha sobrevivido, sino que también se encuentra bajo un constante y fuerte desarrollo. El perfeccionamiento de las técnicas y equipos por parte de la industria de micropavimento, ha beneficiado las tecnologías tradicionales del mortero asfáltico.

Las cajas esparcidoras, que ahora se encuentran disponibles, mejoran el tratamiento superficial y permiten una más alta productividad. De igual forma, se han desarrollado sistemas químicos que pueden trabajar con distintos agregados, proporcionando a su vez superficies más fuertes y durables. El uso de modificadores poliméricos en las emulsiones, así como el uso de materiales más apegados a las especificaciones, han dado como resultado un incremento en la aceptación por parte de agencia federales y estatales en USA.

2.4. Fundamentos del micropavimento

Debido a las solicitaciones impuestas por el tráfico y la acción de los agentes atmosféricos (aire, agua), el ligante asfáltico sufre un proceso de endurecimiento, tornándose rígido y quebradizo y a lo largo del tiempo, ocurre pérdida de material pétreo y la formación de grietas con el siguiente deterioro del pavimento.

Figura 2.2. Formación de grietas en el pavimento



Fuente: Departamento Nacional de Infra-Estructura de Transportes. Brasil, 2005.

Cuando la superficie de rodamiento pierde parcial o totalmente sus características originales, pero reserva una aceptable capacidad estructural, extremadamente importante la aplicación de un programa de mantenimiento eficaz, para aumentar la vida útil de la vía, y por tanto garantizar la economía, el confort y la seguridad de los usuarios.

Con este motivo muchos estudios han sido realizados para mejorar las propiedades reológicas de los pavimentos, con la incorporación de macromoléculas en el ligante, aumentando la resistencia a la deformación, a los esfuerzos tangenciales y de tracción,

provenientes de las sollicitaciones de carga impuestas al pavimento, prolongando la durabilidad del servicio del pavimento asfáltico.

Por tanto, en base al tipo de técnica a ser empleada, es posible seleccionar los modificadores ideales de las emulsiones, a fin de atender con excelencia los cuatro requisitos básicos, requeridos en la selección de un ligante eficaz para los tratamientos superficiales, estos requisitos de selección, son:

- **Termo-susceptibilidad reducida.** La consistencia del betún modificado, permanece inalterada sobre una variación de las temperaturas. En climas fríos, su carácter flexible aumenta la resistencia al agrietamiento y fisuración de la superficie de rodamiento o de revestimiento del pavimento. En climas cálidos, el incremento del punto de ablandamiento y la viscosidad del asfalto, eliminan los riesgos de exudación y de reducción de la macro textura del pavimento.
- **Resistencia cohesiva.** Esta propiedad hace que el ligante conserve las partículas de los agregados unidos, cuando están sujetos a la acción de las cargas de tráfico, principalmente en temperaturas bajas.
- **Excelente comportamiento reológico.** La resistencia a la fluencia y/o recuperación elástica, del asfalto modificado, sobre tensiones de tracción, mantienen la integridad del revestimiento; lo mismo ocurre cuando el pavimento está sujeto a niveles elevados de deformación, pero ocurre lo contrario en el comportamiento de los betunes convencionales, cuyo comportamiento es puramente dúctil.
- **Poder de adhesión.** Los revestimientos bituminosos, cuando están sujetos a la acción del agua y de los efectos abrasivos de los vehículos, tienden a perder adhesión entre la superficie del agregado y el ligante (stripping). El asfalto modificado aumenta la resistencia del revestimiento a estos factores, posibilitando la apertura del camino en intervalos de tiempos menores, sin separación del material pétreo por el tráfico.

En los Estados Unidos, Francia y España, las emulsiones con aditivos especiales que modifican las características normales de una emulsión, como el látex de SBR, y principalmente de asfalto modificado con polímeros de EVA (etileno acetato de vinila) y de SBS (estireno butadieno-estireno); están siendo empleadas con excelentes resultados en diversos tipos de aplicaciones, produciéndose revestimientos menos sensibles a las variaciones climáticas, más flexibles y resistentes a la acción del tráfico.

Figura 2.3. Colocación de micropavimento



Fuente: Departamento Nacional de Infra-Estructura de Transportes. Brasil, 2005.

Cuando es apropiadamente diseñado y construido, el micropavimento ha demostrado prometedores resultados, con 5 años a 7 años de servicio. Porque puede adherirse muy bien con la superficie existente, puede ser aplicado sin desprendimiento de material y generalmente puede ser abierto al tráfico luego de pasada una hora de su aplicación, es por este motivo que es totalmente apropiado para zonas urbanas y carreteras de alto tráfico vehicular.

Considerando el potencial del micropavimento, este ha sido tanto contraste debido a severos factores, como ser: la escasa experiencia en los contratistas, una falta de control de calidad de los agregados y el cemento asfáltico, falta de habilidad del constructor para conseguir la gradación requerida para el agregado, debida a la baja demanda de este tipo de agregado, problemas de los usuarios para poder implementar la tecnología, y la incompleta información sobre el tema. Desde el punto de vista ingenieril, los procedimientos para el diseño del micropavimento, está enterado de esto, y está tomando pasos para llegar a perfeccionar y estandarizar los procedimientos para los ensayos de diseño de mezclas y ajustarlos a diseños estándar para un mejor reflejo de los efectos de variación de espesores y de los materiales que lo componen.

2.5. Ventajas y desventajas del micropavimento

La combinación de materiales seleccionados o de alta calidad, produce revestimientos de espesores reducidos (como promedio, de 0,5 cm a 3 cm) y de alto rendimiento en varias aplicaciones donde los asfaltos convencionales ofrecen desempeños limitados.

2.5.1. Ventajas

Las principales ventajas del sistema de micropavimento son:

- Gran resistencia mecánica a los esfuerzos tangenciales de los vehículos en las curvas, en los tramos de acceso e intersección de vías, en los carriles de uso frecuente de ómnibus, etc.
- Baja susceptibilidad a la temperatura, reduciendo los riesgos de exudación en climas cálidos y de disgregación del revestimiento en climas fríos.
- Excelentes características antideslizantes, aumentando la seguridad del pavimento, principalmente en condiciones climáticas adversas y de tráfico pesado; reduciendo, por tanto, los riesgos de hidroplaneo por la acción del agua y rociado en días lluviosos.
- Menor desgaste por abrasión, eliminando el desprendimiento de agregado por el paso del tráfico o tránsito de vehículos.
- Alto grado de adherencia del revestimiento de micropavimento existente o a la capa inmediata inferior.
- Alta productividad, bajo consumo de energía y flexibilidad del trabajo, permitiendo aplicaciones en días y horarios, que en caso convencional sería inviable; como, por ejemplo, alta humedad y en la noche.
- Reducción del tiempo de interrupción de la vía al tráfico (normalmente, una hora después de su aplicación), y consiguientemente, generando menores trastornos o problemas a los usuarios.
- Significativo aumento de la durabilidad del revestimiento en función de los beneficios anteriormente citados.
- Muy poco o casi nada de niveles de contaminación, debido a que todo el proceso de construcción, es realizado en base al agua, en el cual este producto entra en el ciclo de transformaciones del agua, pues devuelve agua al medio ambiente, debido a la

evaporación de toda la humedad, proceso normal que se produce cuando el agua es distribuida en una superficie expuesta a los efectos del medio ambiente.

2.5.2. Desventajas

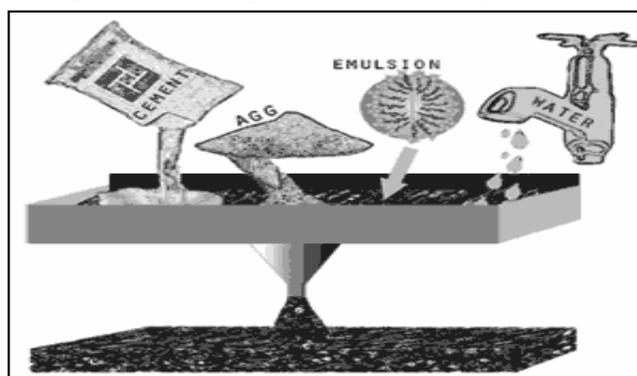
- Las capas delgadas requieren de áridos lavados y con granulometría bastante exigente por lo que debe implementarse plantas trituradoras cuidadosamente instaladas.
- La producción de emulsiones requiere la importación de toda la gama de emulsificantes del exterior, cualquier desabastecimiento implicaría la interrupción del proceso.
- La disponibilidad agua limpia y libre de impurezas es una limitante a tomar en cuenta debido a que en muchos lugares es crítica la obtención.
- Tratándose de una tecnología nueva en el país, requiere de un tiempo prudencial para su adaptación.

2.6. Descripción y usos del micropavimento

El Micropavimento es una mezcla compuesta de emulsión asfáltica modificada con polímeros, agregado 100 por ciento triturado, relleno mineral (filler), agua y aditivos para el control de fraguado (este último, solamente si es necesario).

El relleno mineral es generalmente el cemento Pórtland, pero también puede usarse cal hidrata, la que también ha demostrado ofrecer buenos resultados. Este relleno aparte de rellenar los intersticios de las partículas del agregado grueso, también proporciona las cualidades de cohesión de la mezcla; y por su alta capacidad de absorber asfalto de la emulsión, normalmente controla o determina el tiempo de rotura y curado de la emulsión.

Figura 2.4. Componentes de micropavimento



Fuente: Manual de utilización de emulsiones asfálticas en carreteras, Shell-Colombia S.A. 1992.

El aditivo controlador de fraguado, normalmente es usado para ajustar el tiempo de rotura y fraguado de la mezcla, durante la aplicación en campo.

El micropavimento es básicamente un mortero asfáltico o lechada asfáltica (Slurry Seal), pero con características mucho mejores que el mortero asfáltico normal y por tanto más resistente, ya que, en la fabricación de esta mezcla, se usa una emulsión modificada con algún polímero y un agregado de mayor calidad.

Otra diferencia importante entre el Slurry Seal y micropavimento, es que el primero puede ser puesto en una sola capa de espesor no mayor a 1 ½ veces al tamaño del agregado más grueso en la mezcla (debido al alto contenido de asfalto), el micropavimento puede ser puesto en un espesor relativo por capas, debido al incremento de la estabilidad en la mezcla.

La mezcla en caliente solo es trabajable cuando está caliente, ya que se endurece al enfriar; en cambio el micropavimento puede ser mezclado y aplicado a la temperatura del medio ambiente donde se aplica, por usarse emulsiones asfálticas. En el micropavimento, la emulsión rompe y endurece debido a un proceso electroquímico y a la pérdida del agua en el sistema; por ello, el micropavimento es también denominado como un sistema de mezcla en frío.

La diferencia principal entre diferentes sistemas de micropavimento, radica en que cada una de ellas usa emulsiones modificadas con diferentes tipos de emulsificantes y polímeros usados. Aunque el micropavimento puede ser diseñado para emulsiones

aniónicas y catiónicas, la mayor parte de su empleo a nivel mundial usan las emulsiones Catiónicas.

La apertura al tráfico en el contexto del micropavimento, se refiere al tiempo en el cual el tráfico puede circular sobre la nueva superficie sin dañarla. Las aplicaciones de micropavimento de 13 mm de espesor, normalmente son diseñadas para aceptar el tráfico entre una hora después de vaciado.

El micropavimento no desarrolla ningún comportamiento estructural, por ello no es considerado en el diseño del paquete estructural del pavimento; su única función es la de proporcionar mejoras funcionales de la superficie al igual que otros tratamientos superficiales y se encuentra dentro de los sellos de conservación.

El micropavimento es comúnmente utilizado como un rehabilitador y/o sellante de superficies; también se utiliza en la eliminación de deformaciones producidas por el tráfico, tales como ahuellamientos, levantamientos, corrugaciones, desplazamientos, etc. En otros países es usado para corregir carreteras con exudación de asfalto, desprendimientos de carpeta, sellante de fisuras, bacheos, segregaciones, etc.

Aunque el micropavimento está siendo introducido recientemente en nuestro país, sus múltiples usos ya pueden ser observados en la ciudad de Cochabamba, en recarpetado de calles, pavimento sobre empedrado, corrector de fisuras, carpetado sobre base estabilizada con emulsión, rehabilitación de vías, sellante, etc.

2.7. Rotura, fraguado y curado de la mezcla

Rotura. Es la separación del cemento asfáltico del agua por contacto con una sustancia extraña, como es el agregado o el pavimento. “El proceso de rotura puede ser reconocido por el cambio de coloración de la mezcla de un color café a un negro”.

Tiempo de rotura. Es el tiempo en el que el asfalto empieza a ser separado de la fase acuosa o con agua. Por ejemplo, una emulsión de rotura rápida, generalmente puede romper entre 2 min y 5 min, tomando de 30 min o más minutos para una emulsión de rotura media. La emulsión modificada para micropavimento es normalmente diseñada para una rotura de entre 2 min a 5 min. El propósito del proceso de rotura es cubrir las partículas del agregado en la mezcla. El mineral filler y el aditivo de campo son utilizados para controlar el tiempo de rompimiento de la emulsión de micropavimento.

Fraguado. Es el proceso de coalescencia de las partículas de asfalto y el acercamiento de estos por atracción de la superficie del agregado.

Tiempo de fraguado. Es el tiempo que dura el proceso de fraguado, en el cual, al ejercer una pequeña presión sobre la mezcla, esta expulsa agua clara; en este momento la mezcla ya es resistente al agua y no puede ser mezclada, o sea que en este tiempo la emulsión ha roto, y no puede diluirse o arrastrarse al añadir agua a la mezcla. En la práctica de la aplicación de micropavimento, se dice que el fraguado de una mezcla ha completado (tiempo de durado), cuando esta alcanza una cohesión que resiste a una torsión = 12 kg.*cm., medido en el torsiómetro. Normalmente, el micropavimento es diseñado para un tiempo de fraguado de 20 min.

Curado. Es el proceso de pérdida de la humedad que contiene la mezcla en el momento del amasado (agua de la emulsión y agua incorporada para amasado). Se dice que la mezcla del micropavimento está completamente curada, cuando esta haya expulsado toda la humedad que contenía, ya sea por evaporación, expulsión química, presión o por absorción del agregado.

Tiempo de curado. Es el tiempo que dura el proceso de pérdida de humedad de la mezcla. También es el tiempo necesario para alcanzar una torsión máxima constante de 26 kg*cm en el torsiómetro, o hasta que el pie de goma, es su deslizamiento sobre la superficie de la probeta, no desplace o arranque ninguna partícula del agregado de la muestra y cuando la mezcla haya alcanzado una humedad de 5% a 6%. El tiempo de curado puede durar de 7 días a 15 días, antes de que el micropavimento esté completamente curado. Sin embargo, más del 90% a 97% del agua de la mezcla fresca, es desplazada durante las primeras 25 hr de curado y la pérdida del resto de la humedad, dependerá de las condiciones climatológicas del medio ambiente, del tiempo en que se abre el tránsito y del tipo de servicio al que es sometido el micropavimento. Generalmente la mezcla antes de completar el proceso de fraguado, pierde un cierto porcentaje de humedad (entre 5% y 6%); por ello, el “tiempo de fraguado” también se conoce como “curado inicial”.

2.8. Micropavimento asfáltico en frío (MPAF)

Mezcla compuesta por agregados minerales, filler, agua, emulsión asfáltica modificada con polímeros y aditivo control de rotura (si fuese necesario), con consistencia fluida,

distribuida uniformemente sobre una superficie previamente preparada, a temperatura ambiente y aplicada en espesores milimétricos desde 6 mm hasta 20 mm. Esta aplicación permite el uso de tamaño máximo de agregados hasta de 3/8". De acuerdo a su tamaño, pueden ser:

Tipo I: (espesor de 4 mm a 15 mm)

Tipo II: (espesor de 6 mm a 20 mm)

Tipo III: (espesor de 10 mm a 30 mm)

2.9. Componente de la mezcla para micropavimento

Una mezcla para micropavimento está compuesta por los siguientes componentes:

- Emulsión asfáltica modificada, con polímeros.
- Agregados 100% triturados, de alta calidad y resistencia.
- Relleno mineral o filler (por ejemplo: cemento hidráulico, cal hidratada, etc.).
- Agua.
- Aditivos, para control de fraguado (por ejemplo: sulfato de aluminio).

2.9.1. Emulsión asfáltica modificada

El asfalto en forma de emulsión, es de vital importancia en los procesos de tratamientos superficiales, el desenvolvimiento de estas técnicas también ha sido extremadamente dependiente de los progresos obtenidos en la producción de las emulsiones asfálticas, y gracias a eso, aproximadamente 5.000.000 de toneladas anuales de asfalto son destinados para la fabricación de emulsiones asfálticas modificadas.

La desventaja original de las emulsiones asfálticas tradicionales que limitan su aplicación, han ido desaparecido rápidamente con el desenvolvimiento de las emulsiones especiales, cuyas características de ruptura/adhesividad/cohesión, han sido sensiblemente mejoradas a través del empleo de polímeros y aditivos apropiados.

En Francia, uno de los países más avanzados en el desarrollo de esta tecnología, 8% del consumo total de betunes (cerca de 200000 toneladas anuales), son de asfaltos modificados con polímeros plastoméricos y elastoméricos.

Esta tecnología, también ha extendido el campo de aplicación de los tratamientos superficiales, para una gran variedad de casos que hasta hace poco, eran reservados a otro

tipo de servicio de pavimentos asfálticos, como vías expresas, urbanas, pistas de aeropuerto y pavimentación de puentes.

Dependiendo del tipo de tratamiento superficial empleado, es posible utilizar agentes químicos específicos, para control de la ruptura y curado de las emulsiones asfálticas; normalmente estos son adicionados durante el proceso de mezclado de los diversos componentes.

La emulsión asfáltica catiónica modificada con polímero, es la que se usa corrientemente en mezclas de micropavimento en USA. El contenido residual de asfalto en el micropavimento, varía generalmente entre 5,5% ya 9,5% del peso seco del agregado.

La adición de polímeros generalmente incrementa la rigidez del asfalto y mejora la susceptibilidad a la temperatura. Incrementa la resistencia al rompimiento de la mezcla en zonas con climas cálidos y permite el uso de un cemento asfáltico base más blando, lo cual a cambio provee mejores comportamientos a temperaturas bajas. Los polímeros también mejoran las propiedades de cohesión de la mezcla y la adhesión con la carpeta existente.

Los polímeros pueden ser añadidos en la solución emulsificante o puede ser incluido con el cemento asfáltico en el refinado o en la planta de emulsión, antes de la emulsificación. El procedimiento más aceptable, es el de introducir el polímero en la solución emulsificante.

Normalmente una emulsificación asfáltica modificada para micropavimento, debe contener un promedio de 3% a 5% de polímero, en relación al peso del residuo asfáltico; generalmente un incremento fuera de estos rangos, puede incrementar la densidad de la mezcla. Los ensayos del laboratorio indican que la densidad de la mezcla es también sensible a la cantidad de emulsión asfáltica. Algunos estudios de laboratorio señalan que la adición de polímero, que usualmente lleva a una densidad máxima de la emulsión asfáltica, es de 10% a 12% en peso de la emulsión.

La cantidad y conveniencia del polímero, es determinado por la viscosidad y el punto de ablandamiento del cemento asfáltico. Si el polímero no contribuye a mejorar las características de la mezcla, este rápidamente puede notarse en el residuo asfáltico y en los ensayos de diseño de mezcla.

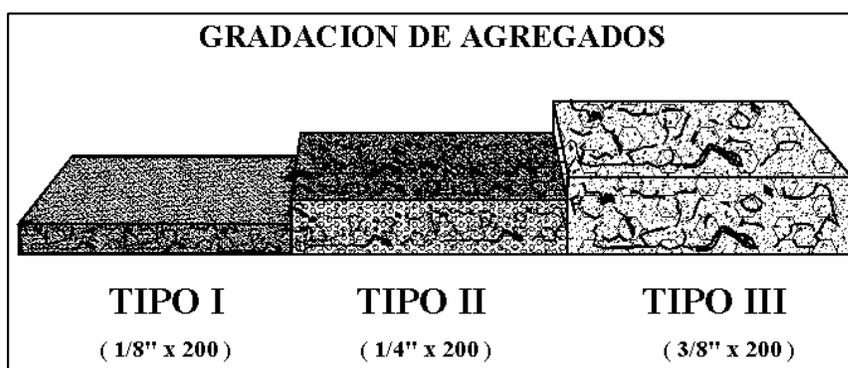
2.9.2. Agregado

Los agregados, excluyendo el mineral filler, constituye un 82% a 90% en peso del micropavimento, dependiendo de la degradación del agregado y su aplicación, teniendo una gran influencia en el comportamiento de este.

Para mejores resultados, el agregado utilizado para micropavimento debe ser 100% triturado, limpio, sus partículas deben ser duras y durables, libres de absorción química, arcilla y otras materias que puedan afectar negativamente la adherencia de las partículas de la mezcla. Preferentemente el agregado triturado debe ser de forma angulosa y no tener demasiadas caras planas, tampoco partículas laminares o alargadas.

La gradación del agregado y otros requerimientos de los componentes de la mezcla para micropavimento, son dados en las recomendaciones de la Internacional Slurry Seal Association (ISSA); y es recomendable que la granulometría del agregado corresponda al tipo II o tipo III, según clasificación de la ISSA.

Figura 2.5. Gradación del agregado para capas fina



Fuente: Boletín norma ISSA

- El tipo I es apenas 3 mm. de espesor, se usa para máxima penetración en carreteras agrietadas, también como aplicación de un sello de protección.
- El tipo II es de 6 mm de espesor, se usa también para sellos reforzados, para corregir procesos de desintegración severa de una carpeta envejecida por la oxidación, igualmente para corregir deformaciones.

- El tipo III generalmente de 12 mm a 16 mm de espesor se aplica para corregir las condiciones superficiales disgregadas, también para otorgar mayor resistencia al deslizamiento. Se recomienda aplicar en dos pasadas con razones de mejor acabado. Los agregados para micropavimento, deben ser de alta calidad y en el diseño de la mezcla en laboratorio, debe seleccionarse el tipo agregado más apropiado y la procedencia más adecuada para las operaciones, cuidando que la distancia para el acarreo sea tolerable.

2.9.3. Relleno mineral

En la gama de los pavimentos asfálticos, comúnmente se denomina como “filler”. Es un producto mineral dividido en partículas muy pequeñas, cuya mayor parte pasa por el tamiz N° 200. El relleno más comúnmente usado, es de piedra calcárea pulverizada (cemento hidráulico), pero también se usan otros polvos de piedra tales como: sílice, cal hidratada y ciertos depósitos naturales de material mineral finamente dividido.

El filler, cumple los siguientes propósitos:

- a) Minimiza la segregación del agregado, ya que una vez mezclado con la emulsión, forma con ella como una sustancia gelatinosa o gel, que no permite la segregación de partículas, manteniéndola a la emulsión en estado de suspensión y distribuido en los intersticios entre partículas del agregado.
- b) Acelera o retarda la velocidad a la que se produce la rotura y la puesta en obra.
- c) Otras funciones de menor importancia del filler son: Rellenar los intersticios entre las partículas del agregado grueso, incrementa la rigidez del asfalto residual y de la mezcla en general.

El cemento Pórtland y la cal hidratada son comúnmente usados en el diseño del micropavimento. Para la mayoría de los agregados, el filler es requerido para que la mezcla sea puesta en obra apropiadamente. El cemento Pórtland, usualmente usado como filler, puede ser incluido para mejorar la gradación, pero el costo puede hacerlo prohibitivo. Normalmente más del 3% de cemento Pórtland ($1/5$ a $3/4$ del porcentaje de cal hidratada) en relación al peso del agregado es especificado para una mezcla.

Cuando el micropavimento carece de filler, la emulsión tiende a escurrirse y bajar de la posición de colocado, en ese caso una parte de la superficie queda sin la cohesión ni la consistencia de un mortero. En cambio, un exceso de finos puede tener resultados

negativos en la resistencia a la abrasión de la superficie del micropavimento; esta resistencia es independiente del ligante asfáltico, pero la influencia del filler puede actuar de forma inversa a la de la emulsión.

El filler, es normalmente aceptado en la mezcla de diseño en laboratorio en base a las certificaciones de cantidad de fábrica, y no requiere ningún ensayo adicional para su control; sin embargo, el cemento hidráulico o la cal apagada, se deben escoger entre aquellas marcas más usadas, que se conozcan su origen y que esté garantizada su calidad; sobre todo el cemento debe ser de fraguado normal, ya que los de fraguado rápido no son compatibles con el micropavimento o con algún otro mortero asfáltico.

2.9.4. Agua

El agua es el medio que facilita el amasado de la mezcla para el micropavimento; es el factor principal y determinante de la consistencia inicial de la mezcla. Normalmente la calidad del agua no es más importante como lo es la cantidad que se debe incorporar.

El agua es introducida en la mezcla en tres formas:

- a) En el contenido de humedad el agregado
- b) Incorporando como porcentaje de la mezcla
- c) Como el segundo mayor componente de la emulsión Asfáltica

Depende de las condiciones de agua y de la absorción del agregado, que se fabrique una buena mezcla de micropavimento. A tiempo de la aplicación de micropavimento, no se debe superar el límite del rango de contenido total de humedad, que típicamente es entre 5% y 12% en peso del agregado seco. Menores cantidades de agua de mezclado se usan durante la temporada de frío (invierno), y mayores durante la temporada de calor (verano). Mezclas con el contenido inferior de humedad, pueden producir una mala adhesión a la superficie existente de pavimento. Por otro lado, mezclas con más del 12% de humedad, el agua puede volver demasiado fluida la mezcla y producirse segregación, lo que se evidencia con el asentamiento del agregado y la flotación del asfalto y finos.

Normalmente el agua no es sometida a pruebas de laboratorio para usar en micropavimento. Sin embargo, si tienen un alto contenido de minerales, puede causar problemas en la mezcla y en el vaciado; por tanto, el agua para usar en la fabricación de

mezclas para micropavimentos, debe ser potable o que cumpla con las especificaciones establecidas para mortero asfáltico.

2.9.5. Aditivos

Los aditivos pueden ser usados para acelerar o retardar el tiempo de rotura o fraguado de una mezcla de micropavimento, pero en la mayoría de los casos solo se hace uso de aditivos para retardar el tiempo de rotura y fraguado, ya que la mayoría de las emulsiones tienen un tiempo de rotura muy corto.

No existe ninguna especificación del tipo de la cantidad de aditivo que debe usarse en la aplicación de micropavimento; pero generalmente se usa entre 0% y 2% en volumen de la emulsión. De manera general, podemos afirmar que, en las temperaturas altas, será necesario determinar en laboratorio las cantidades precisas de aditivo que deben incorporarse en la mezcla

Por tanto, será el laboratorio encargado del diseño del micropavimento, el que recomiende las cantidades de aditivo y las condiciones en las deberán incorporarse aditivo; y el Operador de la micropavimentadora, decidirá la cantidad de aditivo a aplicar, basado en las recomendaciones del laboratorio y las condiciones de la obra.

Generalmente la cantidad de aditivo varía dependiendo de las condiciones ambientales y del tipo de emulsión que se utiliza; que, durante un clima caliente, el aditivo es usado para incrementar el tiempo de rotura y en clima frígido, se usa para acortar el tiempo de rotura. Si el tiempo de rotura no puede ser controlado con la inclusión de aditivo en la mezcla, posiblemente sea necesario reformular la emulsión.

Sin embargo, es muy importante que la cantidad de aditivo sea lo más bajo posible, ya que grandes cantidades de aditivo, pueden provocar que se produzcan glóbulos de espuma en la emulsión, los que nos permitirán un buen mezclado con los demás componentes del micropavimento.

Un aditivo comúnmente utilizado como retardador de fraguado en la aplicación de morteros asfálticos y micropavimento, es el sulfato de aluminio diluido.

2.10. Selección y control de calidad, de los componentes de la mezcla para micropavimento

El proceso de fabricación de una mezcla para micropavimento, se inicia con el control de calidad de cada uno de los componentes. O sea que, si deseamos fabricar mezclas para micropavimento, debemos conocer con certeza las características de cada uno de los materiales que utilizaremos para un buen diseño; por tanto, para conocer estas características, no debemos excluir ninguna prueba de control de calidad de los componentes del pavimento.

Previo al diseño de una mezcla para micropavimento, se deben seleccionar cada uno de los componentes de la mezcla, empezando por el agregado, y siguiendo por la emulsión modificada con polímero, finalizando en el filler y el agua. La mayor parte de los ensayos sobre los componentes de la mezcla son estandarizados por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la American Society of Testing Materials (ASTM).

A continuación, haremos mención a cada una de las pruebas de control de calidad, de los componentes del micropavimento. Sin embargo, los procedimientos que se siguen en cada uno de estas pruebas, presentamos en el Anexo 2 (sobre emulsiones y agregados), de este estudio.

2.10.1. Pruebas sobre los agregados

Los ensayos de los agregados son realizados para determinar el comportamiento que tendrá en la mezcla. A continuación, detallan los ensayos requeridos para el agregado que será utilizado en la mezcla de micropavimento.

Es muy importante que se realicen ensayos permanentemente para un control de calidad del micropavimento, porque la composición y química del agregado pueden variar rápidamente. Muchos agregados usados para el Slurry Seal, son aplicables también para el micropavimento, pero en muchos casos, exigirá un mayor control en sus requerimientos. Los ensayos más importantes e indispensables sobre los agregados para diseño de micropavimento, son las siguientes:

- Prueba de resistencia (abrasión de los ángeles)
- Control de la granulometría (gradación)

- Determinación del contenido de arcillas y materias impuras (equivalente de arena).
- Prueba de reactividad de los finos (azul de metileno)

Sin embargo, tratándose de bancos de préstamo desconocidos, y una inseguridad en la producción de los agregados, también pueden realizarse los siguientes ensayos:

- Muestreo de los materiales pétreos
- Gravedad específica y absorción de los materiales.

a) Prueba de resistencia

El ensayo más comúnmente utilizado para determinar la resistencia de los agregados, es el de abrasión de los ángeles.

Mediante este ensayo, podemos determinar la resistencia al desgaste por abrasión del agregado grueso. Como dijimos anteriormente el agregado debe ser lo suficientemente duro, como para resistir la abrasión durante la mezcla y bajo las condiciones de tráfico. El máximo desgaste permitido de los agregados para micropavimento es de 30% bajo ensayo procedimientos estipulados en la norma ASTM C-131 o AASHTO T96.

Este ensayo es realizado en un cilindro, donde se incorpora un número determinado de esferas, cuya cantidad y peso dependen de la granulometría del material. La cantidad de material debe ser rigurosamente determinando. El cilindro gira, haciendo que al caer las esferas trituren el agregado, en un número determinado de vueltas, luego se retira el material, se tamiza y luego se determina el porcentaje que se desgastó.

b) Control de la granulometría

Normalmente se denomina como gradación y se determina el tamaño de las partículas del agregado, por la separación de estos mediante una serie de tamices de distintas aberturas. El propósito de este ensayo, es el de mantener un apropiado contenido de vacíos en el agregado.

La gradación de los agregados, es muy importante en el cálculo del contenido teórico de asfalto y en la textura de acabado del micropavimento.

Un análisis en laboratorio de los materiales, debe hacerse en un 100% de agregado seco, algunas veces se realiza un lavado del agregado antes de realizar la prueba. Existen dos tipos de gradación recomendada por la ISSA (International Slurry Surfacing Association);

esta recomendación indica que el 100% del agregado para micropavimento, debe pasar el tamiz con abertura de 9,5 mm, o sea que todas sus partículas son de tamaño menor a 9,5 mm.

La gradación del agregado es determinada por un grupo de tamices de distintos tamaños de abertura, en forma progresiva; es usualmente expresada en términos de porcentaje en peso de material pasante o del porcentaje retenido en los tamices. Los dos tipos de gradación para micropavimento, recomendados por la ISSA, se representan en la tabla 2.6, del presente capítulo.

c) Prueba de reactividad de los finos

El ensayo que se sigue para determinar la reactividad de los finos, es el denominado azul de metileno. Es utilizado en varios laboratorios para medir el grado de contaminación entre la materia orgánica y la arcilla que tiene el agregado, ambas sustancias son perjudiciales y pues afectan negativamente a la reactividad de los agregados.

Este ensayo es realizado con la fracción del agregado que pasa el tamiz con abertura de 0,075 mm. Sin contenido de mineral filler (cemento). El ensayo indica la reactividad del agregado y ayuda a determinar el requerimiento de aditivo durante la aplicación en campo; sin embargo, no existe ningún tope en el valor de azul de metileno indicado en las normas ISSA, esto ha sido incluido a través de valores estandarizados por algunos usuarios los cuales lo usan para desechar el agregado que exceda en algún porcentaje de estos valores. Mientras el ensayo es utilizado como un indicador de la reactividad del agregado no existe un consenso en el rechazo de agregado si es alto el valor del azul de metileno.

En este ensayo, el agregado fino es diluido en agua destilada y luego es mezclado con azul de metileno diluido. Normalmente un alto valor de azul de metileno, es asociado a una alta reactividad y un bajo valor del contenido de arena.

2.10.2. Prueba sobre la emulsión asfáltica

Normalmente los productores de emulsiones, realizan ensayos para controlar la calidad de la emulsión para:

- a) Determinar su conveniencia para el uso de micropavimento.
- b) Estar en conformidad con las especificaciones del país en el que se aplica. En este caso se acepta las especificaciones sobre emulsiones dadas por al AASTHO y la ASTM.

Los ensayos indispensables para control de calidad de las emulsiones asfálticas modificadas, que se usarán en micropavimento, son las siguientes:

- Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, ASTM D-255 ó AASTHO T-50.
- Ensayo de sedimentación, ASTM D-255 ó AASTHO T-59.
- Prueba de tamizado, ASTM D-255 ó AASTHO T-59.
- Carga de la partícula, ASTM D-255 ó AASTHO T-59.
- Contenido de asfalto residual, ASTM D-255 ó AASTHO T-50.
- Prueba del potencial hidrógeno pH, ISSA.

2.10.3. Prueba sobre el residuo por evaporación

Estas pruebas se realizan en el residuo de asfalto, que se obtiene del ensayo de contenido de asfalto residual de la emulsión.

Las pruebas que se deben realizar en el residuo de asfalto por evaporación del agua de la emulsión, son las siguientes:

- Viscosidad absoluta a 60°C, poises ASTM 2171.
- Penetración, ASTM D2397 ó AASTHO T-59.
- Punto de ablandamiento, ASTM D2397 ó AASTHO T-59.
- Ductilidad a 25°C y 5 cm/min. ASTM D-113.
- Contenido de polímero en asfalto residual.

2.10.4. Pruebas sobre el relleno mineral

En la práctica general, no se requiere realizar ninguna prueba sobre los rellenos minerales; pero, en caso de que el filler (cemento hidráulico o cal hidratada), sea desconocido y de poca confiabilidad, será necesario realizar las siguientes pruebas:

- Muestreo del cemento hidráulico o Pórtland, ASTM C-183 ó AASTHO T-127.
- Granulometría del filler, ASTM D-556 ó AASTHO T-37.
- Filler para las mezclas asfálticas, ASTM D-252 ó AASTHO T-105.

2.11. Pruebas realizadas en la fabricación de mezclas para micropavimento

Como en cualquier mezcla de superficie, para el comportamiento apropiado del micropavimento, es muy importante contar con agregados de buena calidad. Sin embargo, esta única característica, no podrá asegurar una mezcla satisfactoria de micropavimento; porque cuando son mezclados pueden ser incompatibles entre sí. Esta es la razón por la cual son realizadas las pruebas de diseño en la evaluación del micropavimento.

Las pruebas de diseño son realizadas para determinar dos aspectos importantes:

- La capacidad de mezclado y las características de aplicación de los constituyentes.
- El contenido óptimo de cemento asfáltico.

Para la fabricación de mezclas asfálticas para micropavimento, se pueden realizar las siguientes pruebas:

- Prueba de cohesión, ISSA TB-139, ASTM D-3910-85.
- Prueba de abrasión húmeda (Wet Track Abrasión Test WTAT), ISSA TB-115, ASTM D-3910.
- Prueba de la rueda cargada (Loaded Wheel Test LWT) ISSA TB-109.
- Prueba de la rueda cargada de múltiples capas (Mulilayer Loaded Wheel Test MLWT), ISSA TB-157B.
- Prueba de afinidad de los finos con el asfalto (Schulze-Breuer RUC SBR) ISSA TB-155.
- Prueba de adherencia ISSA-115.
- Prueba de clasificación y tiempo de apertura al tráfico, ASTM D-3910-85.

A continuación, pasamos a describir cada una de estas pruebas, que por ser de poco conocimiento, trataremos de presentar con todos los detalles para una correcta utilización como material bibliográfico.

a) Prueba de cohesión (ISSA TB-139, ASTM D-3910-85)

El ensayo de cohesión es usado para varios objetivos, entre los cuales podemos citar:

El más utilizado, que es para clasificar el micropavimento de acuerdo a su tiempo de fraguado y apertura al tráfico.

También es utilizado para la determinación de los contenidos óptimos de filler y de agua para la mezcla.

El equipo para este ensayo, es un poderoso timonel que simula el torque producido para desgarrar una muestra de 6 mm u 8 mm. De espesor por 60 mm. de diámetro, bajo la acción de un pie de goma de 35 mm. con una carga de 200 kPa.

El ensayo de cohesión es usado en muchos laboratorios para optimizar el contenido del mineral filler con el uso de una curva que es denominada “Benedict Curve”, en el cual se grafican en incremento adicional de mineral filler la cohesión. El contenido óptimo de filler es el valor que da un máximo valor de cohesión. Esto puede ayudar a determinar el rango de mineral filler que da resultados aceptables de laboratorio.

b) Prueba de abrasión húmeda (Wet Track Abrasión Test WTAT), ISSA TB-115, ASTM D-3910

Este ensayo determina la resistencia a la abrasión del micropavimento relativo al contenido de asfalto y uno de los dos ensayos usados en la ISSA para determinar el contenido óptimo de asfalto. Simula las condiciones de abrasión húmeda, tales como la fricción de los automóviles avanzando y frenando. Se realiza una muestra ya curada (fraguada completamente) de 6 mm de espesor por 280 mm de diámetro, con materiales en proporciones obtenidos en el anterior proceso. Luego la mezcla se pone a remojar en periodos de una hora y seis días, son de 550 gr/m² y 800 gr/m², respectivamente. El contenido de asfalto, que cumpla con estos pesos perdidos, es considerado como el contenido mínimo de asfalto. El ensayo de WTAT (Wet Track Abrasión Test) a los 6 días por lo general no es requerido, sin embargo, muchos laboratorios y usuarios usan este ensayo a los días de inmersión, para predecir el comportamiento del sistema.

c) Prueba de la rueda cargada (Loaded Wheel Test LWT) ISSA T-109

Este ensayo es usado para determinar el máximo contenido de asfalto para prever la exudación del asfalto del mortero asfáltico que contiene el micropavimento. Este es acompañado por especificaciones y medidas de la arena que es adherida a la muestra que ha sido sujeta a la carga simulada de una rueda. La ISSA se recomienda un máximo de arena adherida de 550 gr/m² para tráfico de carga pesada. Si la adhesión de arena es inferior a este máximo valor, la exudación no debe ocurrir.

En este ensayo, la muestra tiene un ancho de 50 mm por 375 mm de longitud para espesor deseado, (generalmente 25% de espesor mayor al tamaño máximo del agregado), el cual es puesto en la máquina, la que aplica una carga de 57 kg, en 1000 ciclos a 25°C. Al final de la compactación, la muestra es lavada, y luego secada a 60°C y luego se le pone nuevamente en la máquina previamente pesada. Una cantidad de arena es puesta sobre la muestra, y luego es repetido el proceso, solo con 100 ciclos. La muestra es retirada y luego es limpiada con un pincel toda la arena que no se encuentra adherida, para luego ser pesada. El incremento de peso es anotado, este representa la arena adherida.

d) Prueba de la rueda cargada de múltiples capas (Mulilayer Loaded Wheel Test MLWT), ISSA TB-157B

El ensayo de rueda cargada sobre una muestra representativa a una aplicación de múltiples capas, es usado para estudiar las propiedades de compactación del espécimen de asfalto. El espécimen puede usar agregado entre 0 mm y 5 mm o 0 mm a 8 mm dentro de los moldes de 13 mm a 19 mm de espesor ancho de 50 mm y de largo de 380 mm esta muestra es secada a temperatura ambiente durante 25 hr y luego es secada en horno a 60°C por 18 hr a 20 hr. Posteriormente es enfriado a temperatura ambiente durante 2 hr, finalmente, esta muestra es pesada y compactada con 1000 ciclos de carga con 57 kg a una temperatura ambiente de 2°C al final de este ensayo, el porcentaje de desplazamiento lateral y la densidad de compactación es determinada. Para este ensayo se puede usar el mismo equipo usado para la prueba de la rueda cargada.

Un límite recomendable para una compactación específica es de 2.10. una gráfica de la compactación específica vs. El número de ciclos de la rueda cargada, puede ser desarrollada para este propósito. Este ensayo puede ser usado para determinar el espesor máximo de la capa de aplicación y para presidir la cantidad de carpeta requerida que permita un tráfico inicial de compactación. Los rangos de desplazamientos son de 10 % a 12% de deformación vertical y un 5% de desplazamiento lateral, recomendados para el diseño en laboratorio.

e) Prueba de adherencia ISSA – 115

El recubrimiento del agregado es un proceso que empieza y continua progresivamente

hasta que la mezcla rompe, fragua y es curada. Al final del proceso de curado, el recubrimiento del agregado con cemento asfáltico es completado. El resultado del recubrimiento del agregado, es debido a las condiciones de adherencia entre el agregado y el asfalto.

f) Prueba de clasificación y tiempo de apertura al tráfico, ASTM D-3910-85

Esta prueba es muy importante realizar, tratándose de vías urbanas, ya que la apertura al tráfico, es determinante en el éxito de la aplicación de micropavimento; ya que, a mayor tiempo de interrupción del tráfico, mayor serán las molestias que sientan los usuarios, especialmente si se trata de una vía de alto tráfico y difícil de descongestionar o proveer de rutas alternativas, considerando que el área urbana todas las vías son de rutas definidas e imposibles de cambiar de un momento a otro.

Este ensayo se basa en la prueba de cohesión, (20, 30, 60, 90, 150, 210 y 270 min). Dependiendo del tipo de emulsión y los tiempos probables de rotura, el torque es aplicado a distintas muestras y en diferentes tiempos transcurridos desde su colocado en los moldes o fin del mezclado; normalmente los ensayos para clasificación, se realizan desde los 20, 30, 60, 90, 150, 210 y 270 min, los que inclusive permitirán graficar una serie de curvas de clasificación del micropavimento en función del tiempo de curado y la cohesión de la mezcla. Sin embargo, más adelante detallaremos la prueba de clasificación del micropavimento.

Como se indicó anteriormente, un sistema de mortero o micropavimento, es definido como “de rotura rápida” si desarrolla un valor de torque de 12 kg*cm en 20 min a 30 min; esta torsión, es definido como el valor con la cual la mezcla rompe, no puede ser remezclado y es resistente al agua. En forma similar una mezcla que desarrolla 20 kg*cm en 60 min o 1 hr, es considerado como un “sistema de tráfico rápido”, cuando la mezcla alcanza este valor de torque, se considera que ha desarrollado suficiente cohesión como para poder liberar al tráfico.

A diferencia de los morteros asfálticos comunes, el micropavimento es diseñado para una de “rotura rápida” y un “Sistema de tráfico rápido”. En otros lugares donde se ha aplicado el micropavimento, se han definido otros términos mucho más apropiado como “tiempo de fraguado” al “quick set” y “tiempo de apertura al tráfico” al “quick traffic system”.

2.12. Parámetros de diseño

Existen muchos parámetros de diseño como ser:

2.12.1. Parámetros sobre los componentes

Los parámetros de los materiales que componen la mezcla son:

2.12.1.1. Agregados

Los agregados excluyendo el mineral filler, constituye un 82% a 90% en peso del micropavimento, dependiendo de la gradación del agregado y su aplicación, teniendo una gran influencia en su comportamiento mecánico. Para mejores resultados, el agregado debe ser 100% triturado, limpio, duro y durables, libres de absorción química, arcilla y otros materiales que puedan afectar la unión de la mezcla y la puesta en obra.

Tabla 2.1. Granulometrías para micropavimento recomendados

Tamaño del tamiz	Tipo de gradación	
	Tipo II	Tipo III
9,5 mm. (3/8")	100	100
5,75 mm. (N° 5)	90 – 100	70 – 90
2,36 mm. (N° 8)	65 – 90	55 – 70
1,18 mm. (N° 16)	55 – 70	28 – 50
600 μm. (N° 30)	30 – 50	19 – 35
300 μm. (N° 50)	18 – 30	12 – 25
150 μm. (N° 100)	10 – 21	7 – 18
75 μm. (N° 200)	7 - 15	7 - 15

Fuente: Norma ISSA

Preferentemente, el agregado triturado debe ser anguloso y no tener demasiadas caras planas, tampoco partículas laminares o alargadas. La gradación del agregado y otros requerimientos de los componentes de la mezcla, son dados en las recomendaciones de la International Slurry Seal Association (ISSA).

A continuación, presentamos los parámetros para las pruebas de calidad de los agregados:

Tabla 2.2. Resumen de las pruebas y parámetros sobre agregados comúnmente utilizados para micropavimento

Pruebas	Normas			Significados	Parámetros de diseño
	ASTM	AASHTO	ISSA		
Calidad	C 88	T 105	-	Durabilidad a la desintegración por meteorización	Pérdida de peso Máx. 15 a 20 %
Ensayo de abrasión de los ángeles	C 131	T 96	-	Dureza, resistencia a la abrasión, en condiciones de tráfico	Pérdida de peso Máx. 30 %
Forma y textura de la partícula	D 3398 D 5791	-	-	Trabajabilidad, dureza y resistencia a la fricción	100% triturado y buena textura
Gradación	C 136	T 27	-	Cálculo del contenido de CA, mantener un contenido apropiado de vacíos, pruebas que afectan la superficie, trabajabilidad.	Tipos ISSA II y III
Equivalente de arena	D 2519	T 176	-	Determinación de la cantidad de arcilla y finos plásticos	Mínimo 60 %
Peso unitario	C 29	T 19	-	Determinación del cambio del agregado en peso con el cambio del contenido de humedad	-
Gravedad específica	C 127 C 128	T 85	-	Determinación del contenido de cemento asfáltico	-
Azul de metileno	-	-	TB 155	Determina la reactividad de los finos	Máximo 13

Fuente: Norma ISSA

2.12.1.2. Emulsión y residuo asfáltico

Las especificaciones de las emulsiones y el residuo asfáltico, deberán enmarcarse a las especificaciones del tipo de emulsión que se va a utilizar, de acuerdo a las condiciones de las normas ASTM D-977 y D-2397; AASHTO M-150 y M-208, además de la ISSA T-102.

Sin embargo, es recomendable que las emulsiones asfálticas para micropavimento sean de tipo CSS1 o CSS-1h, o sea de tipo catiónicos de rompimiento lento y deben de cumplir con los parámetros de la tabla 2.10.

El tiempo de rompimiento y curado de las emulsiones para, micropavimento, será tal que permita la apertura al tráfico en 1 hr.

Tabla 2.3. Parámetros sobre emulsiones comúnmente utilizados para micropavimento

Prueba	CSS-1	CSS-1h
En la emulsión:		
Viscosidad a 25 °C, en (s.)	20 –100	20 – 100
Estabilidad en 25 hr, en (%)	Máximo 1	Máximo 1
Sedimentación en 5 días, en (%)	Máximo 5	Máximo 5
Tamizado N° 20, en (%)	Máximo 0,1	Máximo 0,1
Carga de la partícula (+/-)	(+)	(+)
Mezcla con cemento, en (%)	Máximo 2.0	Máximo 2.0
Residuo asfáltico, en (%)	Mínimo 60	Mínimo 57
En el residuo por destilación:		
Viscosidad absoluta a 60 °C, en (s.)	100 – 250	50 – 90
Penetración, 25 °C, con 100 gr en 5 seg.	Mínimo 50	Mínimo 50
Ductilidad a 25 °C, a 5 cm./min	Mínimo 97,5	Mínimo 97,5
Solubilidad en tricloroetileno, en (%)	97	97
Residuo de polímero, en (%)	3 - 5	3 - 5

Fuente: Norma ISSA

2.12.1.3. Relleno mineral

El relleno mineral o filler que se emplean en los sistemas de micropavimento, deben cumplir con las especificaciones ASTM D-252. entre los rellenos minerales más conocidos tenemos, al cemento hidráulico o Pórtland, cal hidratada, cenizas volcánicas, etc. cualquiera de estos, puede ser empleado en la mezcla del micropavimento y debe ser considerado como parte de la granulometría del agregado. En caso de utilizar el cemento Pórtland como filler, la mezcla deberá contener un promedio de 3% del peso del agregado seco, en cambio sí se usa cal hidratada, deberá contener entre ¼ % hasta ¾ % en relación al peso del agregado; pero esta cantidad deberá ser ajustada para el tipo de agregado que se cuenta.

2.12.1.4. Agua

El agua debe ser potable o cumplir con las especificaciones establecidas para la mezcla del micropavimento. Su compatibilidad debe ser garantizada por el contratista y comprobada por el laboratorio de control; las mezclas para micropavimento deberán amasarse con un contenido de agua del 10% al 15% en peso del agregado.

2.12.1.5. Aditivo

Los aditivos pueden ser empleados para acelerar o retardar el tiempo de curado o fraguado de un micropavimento. Deben emplearse en las cantidades predeterminadas en el diseño del laboratorio aprobadas por las autoridades contratantes.

El aditivo debe ser especificado por el contratista, así como su origen y en forma de empleo, ya que su acción puede ser como acelerador o retardador del rompimiento de la emulsión y en consecuencia el curado del mortero. En caso de ser necesario, normalmente se debe incorporar entre 0% y 2% del volumen de la emulsión.

2.12.2. Parámetros de dosificación del micropavimento

Dosificación de los componentes del micropavimento:

En forma general, las mezclas del micropavimento, deberán tener la siguiente dosificación de sus componentes:

Tabla 2.4. Dosificación estándar de mezclas para micropavimento

Componente de la mezcla	Agregado	
	Tipo II	Tipo III
Contenido de asfalto en la mezcla, en (% del peso del agregado seco)	8 – 11	7 - 12
Contenido del asfalto en la emulsión en (% del peso de la emulsión)	Mínimo 60	Mínimo 60
Mineral filler, en (% del peso del agregado seco)	0 – 3,5	0 – 3,5
Polímero modificador, en (% de sólidos en peso del residuo asfáltico)	Mínimo 3	Mínimo 3
Tasa de aplicación, en (kg./m ² del peso del agregado seco)	5.5 – 10,6	8,1 – 16,2
Agua, en (% del peso del agregado seco)	8 – 15	8 - 15
Aditivo, en (% del volumen de la emulsión)	0 – 2	0 – 2

Fuente: Norma ISSA

2.12.3. Parámetros de la mezcla para micropavimento

En el siguiente cuadro, se presentan los parámetros, en las que deberán enmarcarse los resultados de las pruebas sobre las mezclas para micropavimento y mortero asfáltico.

Tabla 2.5. Parámetros de diseño para mezclas de micropavimento

Norma	Prueba	Parámetros de diseño	
		Mortero asfáltico	Micropavimento
ISSA TB-115 ASTM D-3910	Pérdida por desgaste (abrasión húmeda WTAT, inmersión 1 h.), en (gr/m ²)	Máximo 750	Máximo 550
ISSA TB-109	Adherencia de arena (Rueda cargada LWT), en (gr/m ²)	Máximo 750	Máximo 550
ISSA TB-155	Afinidad finos – asfalto SBR, en (puntos)	Mínimo 11	Mínimo 11
ISSA TB-157B	Desplazamientos por compactación MLWT, en (%)	V: Máx. 12 H: Máx. 5	V: Máx. 10 H: Máx. 5
ISSA-115	Adherencia (agregado-asfalto), en (%)	Mínimo 90	Mínimo 95
	Tiempo de mezclado, en (min)	Mínimo 3	Mínimo 3
ISSA T-106	Consistencia, en (cm)	2 – 3	2 – 3
ISSA A-105	Tiempo de rotura, en (minutes)	10	2 – 5
ISSA T-139	Tiempo de fraguado o curado inicial (cohesión = 12 kg*cm.), en (min)	30	20
ISSA T-139	Tiempo de apertura al tráfico (cohesión = 20 kg*cm), en (min)	60	60

Fuente: Norma ISSA

2.13. Diseño del micropavimento

Las bases del método de diseño del Micropavimento, presentados en este estudio están basados en las normas de diseño ISSA; la cual, a su vez, para determinar la calidad de los componentes de la mezcla, remite a las normas ASTM y AASTHO.

2.13.1. Generalidades

Debido a que el micropavimento no depende de la estructura de una calle para su diseño, este se basa solamente en los materiales que entran al sistema. El diseño debe realizarse para un tipo de agregado específico, el cual se utilizará a lo largo del proyecto. En el caso de variar la procedencia del agregado, se realizará nuevamente un diseño, pues a pesar de que la granulometría está normada bajo ciertos rangos, puede existir ligeras variaciones

en su composición que alteren el producto, como por ejemplo el grado de absorción de humedad, suciedad, laminaridad, dureza, etc.

Así mismo podemos indicar, que el micropavimento no depende del lugar, ni de la superficie en la cual se vaya a aplicar, sino simplemente de los tipos y características de materiales que ingresen o los ingredientes de la mezcla.

De acuerdo a la experiencia en proyectos donde se utilizan agregados pétreos, sabemos que usualmente los materiales para cada trabajo, varían de un lugar a otro o dependiendo del lugar donde se ubica la obra; por ello será necesario realizar nuevos diseños para cada tipo de materiales, especialmente tomando en cuenta tanto la granulometría como el equivalente de arena, ya que éstos parámetros, son las más importantes para poder calificar a un agregado como apto para el micropavimento y son estas las que influyen enormemente en los resultados de diseño.

Si dos muestras de un mismo material tienen diferentes equivalentes de arena, su comportamiento será diferente una de la otra; normalmente a mayor equivalente de arena, mayor resistencia de la mezcla, pero pueden suceder desprendimiento de material por otros factores.

Sabemos que el filler tiene dos funciones importantes en la mezcla, acelerar o retardar el rompimiento de la emulsión (según el tipo de emulsión que se emplee) y también forma un gel que mantiene la emulsión en suspensión perfectamente bien repartida en la mezcla. Cuando se carece de filler, la emulsión tiende a bajar y escurrirse; en este caso la superficie del tratamiento aplicado queda sin cohesión. Un exceso de filler puede tener resultados negativos en la prueba de abrasión, siendo esta independiente del porcentaje de ligante asfáltico. Según la experiencia en trabajos similares, una mezcla consistente de micropavimento requiere un promedio de 3% en peso del agregado seco, de relleno mineral.

El tipo de emulsión, deberá ir de acuerdo con las exigencias del mismo trabajo; sin embargo, es recomendable utilizar emulsiones superestabilizadas, ya que ellas tienen la suficiente estabilidad como para poder ser manejadas por cualquier máquina aplicadora, pero tiene sus limitaciones definidas por las condiciones climatológicas.

Previo al diseño del micropavimento, deberán ensayarse todos los materiales componentes de este sistema, pudiendo antes de seguir con el diseño, rechazar de antemano los

ingredientes que no se enmarquen dentro los rangos permisibles para micropavimento, indicados en el subtítulo anterior.

El método de diseño está basado en la información obtenida de la norma de diseño ISSA (Institute of Slurry Seal Association), la cual a su vez toma las normas ASTM y AASHTO para la calidad de los materiales.

2.13.2. Procedimiento de diseño de una mezcla para micropavimento

Para realizar un diseño adecuado y confiable a nuestros intereses, debemos seguir los siguientes pasos:

Paso 1.- Verificación de la calidad o selección de los componentes de la mezcla para micropavimento.

Paso 2.- Determinación del contenido teórico de asfalto.

Paso 3.- Determinación de los contenidos óptimos de agua, relleno mineral y aditivo.

Paso 4.- Determinación del contenido óptimo asfalto,

Paso 5.- Verificación del comportamiento relativo de la mezcla.

Paso 6.- Clasificación y determinación de las características iniciales de la mezcla.

A continuación, pasamos a detallar los 6 pasos del diseño del micropavimento.

Paso 1.- Verificación de la calidad o selección de los componentes de la mezcla para micropavimento

Antes de ingresar a determinar la dosificación de los componentes de una mezcla para micropavimento, deben realizarse todas las pruebas necesarias, para conocer con certeza las características de cada uno de los componentes de la mezcla. Para ello deberán realizar los ensayos mencionados en este capítulo.

De no ingresar en los márgenes permisibles, y si las deficiencias no son significativas, debe considerarse la posibilidad de realizar otros ensayos que ratifiquen o modifiquen las conclusiones de los primeros ensayos.

Si los materiales analizados son de completo desconocimiento y crean susceptibilidad de algún resultado desfavorable, deberán realizarse por lo menos tres ensayos de cada prueba requerida sobre los agregados para micropavimento.

Si finalmente los resultados de las pruebas indicadas no se enmarcan en los parámetros de diseño, deberán buscarse nuevos bancos de préstamo, donde las condiciones de los materiales son apreciablemente mejores que los rechazados. Y por supuesto, que deberán repetirse todas las pruebas de diseño requeridos.

Paso 2.- Determinación del contenido teórico de asfalto

Es muy importante determinar el contenido teórico del asfalto o capacidad de absorber asfalto de un agregado; depende fundamentalmente de la granulometría y la densidad de los agregados.

Existen varios métodos para determinar el contenido teórico de asfalto residual de una mezcla. Sin embargo, personalmente creo que el más adecuado y que se aproxima a los resultados finales, es el método del Factor de Superficie Específica, que presentamos a continuación. La superficie específica de un agregado aproximadamente del mismo tamaño de partículas, tal el caso de la granulometría del micropavimento o mortero asfáltico, está dado por la relación:

$$FSE_j = \frac{2.5}{(\phi_i * \phi_{i-1})^{1/2}}$$

$$SE = 0.01 \sum [(FSE_j) (\% \text{ Retenido en cada Tamiz})]$$

donde:

SE = Superficie específica, en (m²)

FSE_j = Factor de Superficie Específica, del material retenido en cada tamiz, en (m²).

Φ_i = Abertura de tamiz base, donde es retenido el material, en (mm)

Φ_{i-1} = Abertura tamiz inmediato superior, en (mm).

Para facilitar los cálculos, es conveniente elaborar una tabla similar al siguiente ejemplo:

Tabla 2.6. Cálculo de la superficie específica del agregado

Tamiz	Abertura (mm.)	FSE	% retenido en cada tamiz	SE. parcial = FSE* %ret./100
3/8"	9,525	0,2273	0,0	0,0000
Nº 5	5,760	0,3713	2,2	0,008351
Nº 8	2,380	0,7528	28,9	0,215603
Nº 16	1,190	1,5855	22,7	0,336683
Nº 30	0,590	2,9836	13,0	0,387155
Nº 50	0,297	5,9722	8,0	0,575298
Nº 100	0,159	11,8852	5,7	0,555153
Nº 200	0,075	23,8085	3,1	0,751539
Base		130,8550	17,5	22,863750
Superficie específica = suma sup. esp. parciales:				25,5825

Fuente: Norma ISSA

Con este valor, se ingresa a la curva de la figura 2.6 de donde podemos determinar el contenido teórico de asfalto residual de una mezcla para micropavimento. Y finalmente el Porcentaje de Emulsión Teórico, estará dado por:

$$E = \frac{A.R.}{C} \cdot 100$$

Donde:

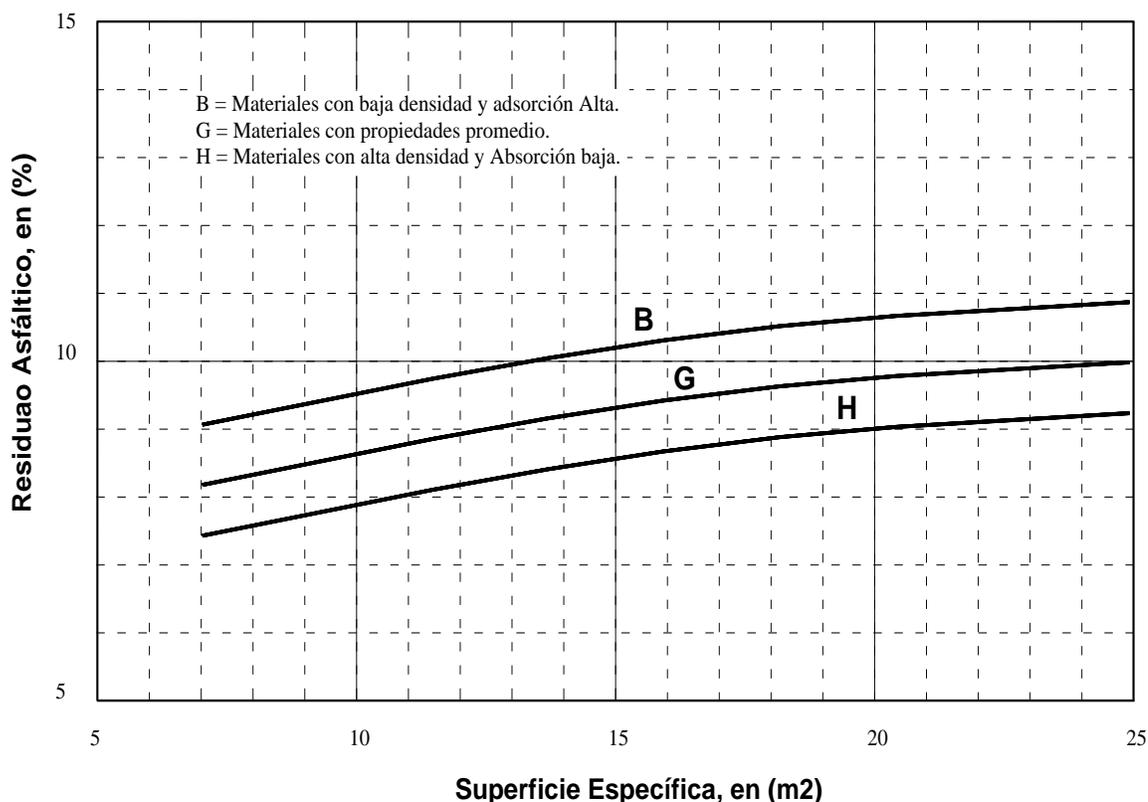
E = Porcentaje de emulsión correspondiente a un residuo asfáltico, en (%)

A.R. = Asfalto Residual de una mezcla, en (%)

C = Concentración de cemento asfáltico en la emulsión, en (%)

En la figura 2.6. observamos el ábaco para determinar el contenido teórico de residuo asfáltico, por el método de superficie específica de los agregados.

Figura 2.6. Residuo asfáltico vs. superficie específica



Fuente: Norma ISSA

Paso 3.- Determinación de los contenidos óptimos de agua, relleno mineral y aditivo

Para concretar este paso, se realizan tanteos con diferentes cantidades de los diferentes ingredientes de la mezcla del siguiente modo:

Se determina la cantidad inicial de agua, apropiada para que la mezcla resulte ser consistente y manejable. Este porcentaje de agua, será aquel que al incorporarse en la arena y mezclarse sin emulsión, produzca una mezcla fácilmente trabajable, suelta sin que exista agua libre.

Para determinar el porcentaje óptimo de agua para mezclado, se preparan 5 mezclas con incrementos de 1% de agua, a partir de 2% menos que la cantidad hallada como cantidad inicial de agua, porcentaje de emulsión, correspondiente al residuo asfáltico teórico constante en cada mezcla y 3% de filler, también constante. Ello quiere decir que se preparan 2 mezclas con porcentajes menores de agua y 2 con porcentajes mayores que el Agua Inicial. Se deberá observar cuidadosamente el comportamiento de cada una de las

mezclas en el proceso de amasado (trabajable o no), antes de los 3 min de haber mezclado, se debe medir la consistencia y luego registrar los tiempos de rotura y fraguado inicial; de este proceso, podremos definir el porcentaje óptimo de agua para el mezclado.

Para determinar el óptimo contenido de relleno mineral, se preparan muestras para ensayo de cohesión, manteniendo constantes el porcentaje de emulsión asfáltica teórica y porcentaje óptimo de agua para mezclado, se deben incorporar diferentes porcentajes de filler, haciendo varias en 1% de cemento hidráulico ó 0,25% de la cal hidratada, a partir de 0 hasta 5% (mínimo tres muestras por cada porcentaje de filler, o sea 12 muestras). Las que deberán someterse a las pruebas de cohesión, a los 30, 60, y 90 min de curado, de cada porcentaje de filler. En este proceso también debe medirse la consistencia de la mezcla, ya que ello nos ayudará a conocer la trabajabilidad de la mezcla.

Con el contenido teórico de asfalto, % óptimo de agua para, mezclado y óptimo contenido de filler, se preparan 5 mezclas con contenidos de 0,5; 1; 1,5; 2 y 2,5% de aditivo, en relación al volumen de la emulsión. Se debe observar cuidadosamente el comportamiento de la mezcla a tiempo del mezclado, ya que pueden ir apareciendo burbujas de emulsión o demasiado brillo en la superficie de la mezcla. También se debe controlar muy atentamente los tiempos de rotura y curado inicial de cada una de las mezclas. Deberán anotarse todas las observaciones. Posteriormente cada una de las muestras, deberán ensayarse a la cohesión, cuyos resultados ayudarán a definir el Requerimiento Óptimo de Aditivo, que deberá incorporarse a la mezcla.

Paso 4. - Determinación del contenido óptimo asfalto

En los diseños de laboratorio se usan dos tipos de ensayos para determinar el contenido de cemento asfáltico de una mezcla para micropavimento. Los más conocidos son el procedimiento de la ISSA y el método Marshall modificado.

Dado que el procedimiento de la ISSA, está orientado al comportamiento de morteros asfálticos propiamente dicho, en cambio el método Marshall es para cualquier mezcla en frío o con emulsión, cuyas capas no siempre son delgadas; optamos por seguir el procedimiento de diseño de la ISSA.

Procedimiento ISSA

Bajo el procedimiento ISSA, el contenido óptimo de asfalto es determinado por la combinación gráfica de una serie de resultados de las pruebas de abrasión húmeda (Wet Track Abrasión Test o WTAT) y la rueda cargada (Loaded Wheel Test).

ISSA recomienda que el contenido de asfalto residual de un mortero asfáltico o micropavimento, esté entre 8% y 11% para agregados del tipo II, y entre 7% y 12% para agregados del tipo III.

Para un diseño confiable y seguro, se deben ensayar muestras de micropavimento que estén preparados con diferentes contenidos de emulsión, pero con contenidos constantes de agua, filler y aditivo (este último si es necesario), ósea en el porcentaje óptimo de agua para mezclado, óptimo contenido de relleno mineral y requerimiento óptimo de aditivo.

Para poder graficar correctamente estas curvas deberán contarse por lo menos con 3 puntos para la prueba LWT y 3 puntos para la prueba WTAT. Esta gráfica se la realiza sobre un sistema de coordenadas cartesianas, en cuyas abcisa se debe colocar el contenido de emulsión, y en la ordenada tanto las pérdidas por abrasión, como el peso de la arena adherida, deberán unirse los puntos que corresponden a cada prueba, asimilándose la prueba WTAT a una hipérbola y para la prueba LWT a una recta, similar a las curvas de la figura 2.18.

Normalmente, la prueba WTAT determina el contenido mínimo de emulsión que debe tener una mezcla para mortero o micropavimento; en cambio la prueba LWT, determina el contenido máximo de emulsión que debe tener una mezcla.

Se considera como contenido óptimo de emulsión, aquel que determina el punto de intersección entre ambas líneas, con la tolerancia de $\pm 1,5\%$. sin embargo, se puede admitir como máximos valores de tolerancia, los contenidos de emulsión, que varíen $\pm 3\%$ del contenido óptimo de emulsión.

Limitaciones y recomendaciones del diseño ISSA

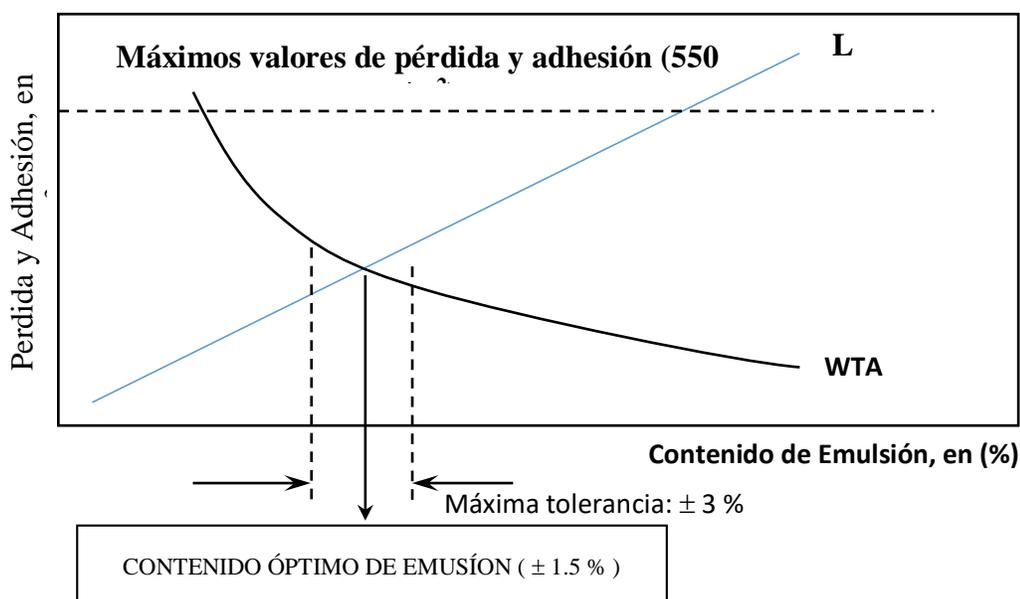
Los ensayos de laboratorio han demostrado que la exactitud y la repetición de los resultados pueden ser afectadas por muchos factores. El micropavimento es un sistema muy sensible al agua. Una variación de 1% a 2% en el contenido de agua puede tener efectos significativos en los resultados de laboratorio y en calidad de la aplicación. El

diseño de la mezcla debe habilitar al operador para mezclar los ingredientes con la mínima cantidad de agua y aditivo, posible.

La preparación de la mezcla, tiene significativa influencia en los resultados de las pruebas; por ejemplo, si no se tiene un control riguroso de la dosificación de cada ingrediente y no se realiza un buen amasado, pueden producirse segregación de agregado, escurrimiento de la emulsión, descubrimiento del agregado, etc., lo que podría derivar en fallas de aplicación, que tendrían que ser atribuibles al diseño, ya que estas fallas son difíciles de corregir.

Por tanto, las pruebas de diseño en laboratorio, deberán simular las condiciones de aplicación en obra; para ello, deben tomarse en cuenta las condiciones de temperatura y humedad, del lugar de la obra y del laboratorio, las que no siempre serán iguales, ya que estos factores de medio ambiente inciden enormemente en el comportamiento inicial del micropavimento; de esta manera se puede conseguir resultados similares, tanto de diseño en laboratorio, como en obra.

Figura 2.7. Determinación del contenido óptimo de asfalto



Fuente: Norma ISSA

El valor de la torsión es medido en laboratorio bajo ciertas condiciones, que no han sido correlacionadas con el comportamiento del pavimento en servicio. La mezcla y el ensayo

de cohesión húmeda, debe ser desarrollado por varios contenidos de humedad y a distintas temperaturas para poder simular las condiciones probables que se puedan presentar en la aplicación. En muchos casos, el pavimento ha requerido mayor tiempo para alcanzar la torsión necesaria por el curado inicial y por supuesto por el tiempo de apertura al tránsito. Algunos autores han tomado parámetros para determinar el tiempo de apertura al tráfico y el tiempo de fraguado, con respecto a la deformación producida en la muestra luego de aplicado el torque, debido a la variación de las condiciones de aplicación de dicha fuerza con respecto a las condiciones de campo.

Se conoce que la prueba de abrasión húmeda WTAT, ha sido desarrollada solo para aplicaciones con espesores de 6 mm y para gradaciones de los tipos I y II. Por tanto, un límite de pérdida por abrasión de 550 gr/m^2 , puede no ser apropiado para otros espesores u otras gradaciones de agregados. También en el ensayo de una (1) hora de inmersión en agua de la prueba WTAT, pueden ocurrir errores, pues algunos agregados pueden ser luminosos, los cuales cambian las condiciones de resistencia a la abrasión luego de ser sumergidas por más tiempo; esto se puede entonces verificar solamente con el ensayo después de 6 días de inmersión en agua.

En el ensayo de la rueda cargada LWT, existen otros cuestionamientos como ser: El movimiento de la rueda que es accionada por empujes y jalado, por la rotación del brazo de accionamiento del motor (biela), que gira en forma circular, pues el punto de accionamiento del conjunto rueda cargada, se mueva para abajo y hacia arriba, y no como los automóviles cuyo accionamiento es horizontal. Este cambio influye en la presión de contacto entre rueda y muestra de micropavimento, ya que esta presión no es constante y puede variar dependiendo de la altura en que se encuentre el punto de accionamiento del brazo (Biela Motriz). Este brazo debe ser modificado para mantenerlo siempre en posición horizontal.

Por otra parte, las cajas para pesas, debe ser rediseñada, ya que como se muestra en la máquina las pesas no son sujetadas, sino solamente puestas sobre la caja; por lo tanto, estas tienden a removerse constantemente, por el efecto de los movimientos bruscos de esta caja tanto en dirección horizontal como vertical.

En la muestra del ensayo de la rueda cargada LWT, la exudación puede ser producida por un nivel de agua que no ha sido bien controlada, lo cual puede alterar la adhesión de la

arena. Esto ocurre generalmente en la preparación de la muestra, para que sea más consistente.

Paso 5.- Verificación del comportamiento relativo de la mezcla

El último paso en el proceso de diseño de la mezcla para micropavimento, se trata de la verificación o simulación del comportamiento del micropavimento durante el servicio que ofrezca. Cabe señalar que este procedimiento solo es especificado en la norma ISSA, pues no existe referencia en la AASHTO ni en la ASTM.

Los resultados de este paso del diseño, pueden proveer algunas medidas de control, mantenimiento y lineamientos para la administración de un Tratamientos superficial con micropavimento.

Las pruebas que deben realizarse para determinar el comportamiento relativo del micropavimento, son las siguientes:

- Prueba de la rueda cargada de múltiples capas (Multilayer Loaded Wheel Test MLWT) ISSA TB-157B.
- Prueba de afinidad de los finos con el asfalto (Schulze-Breuer y RUC SBR – ISSA TB-155).
- Prueba de adherencia, ISSA-115.

Paso 6.- Clasificación y determinación de las características iniciales de la mezcla

Para la concreción de este paso, se debe realizar la “Prueba de clasificación y tiempo de apertura al tráfico ASTM D-3910-85”, este proceso es lo siguiente:

- Medir la consistencia de cada una de las mezclas, y registrar como consistencia, el promedio de los valores medidos.
- Registrar todos los tiempos de rotura de la mezcla, y registrar como tiempos de Rotura, el valor promedio de estos valores.
- Del ensayo de clasificación, se determinará tiempo de fraguado y tiempo de apertura al tráfico.

2.14. Consideraciones para la aplicación de micropavimento

Para poder aplicar el micropavimento hay que tener las siguientes consideraciones:

2.14.1. Limitaciones para la aplicación – condiciones climáticas

El micropavimento o cualquier otro tipo de mortero, no deben aplicarse cuando la temperatura del pavimento o la temperatura del aire son inferiores a 15°C y se espera una caída de temperatura o está lloviendo, pero es aceptable cuando la temperatura es aproximadamente a 17°C en ascenso.

En general este tipo de tratamientos, no debe aplicarse si se puede haber peligro de temperaturas de congelación; tampoco es recomendable cuando las condiciones climatológicas prolonguen el tiempo de curado del mortero o exista posibilidad de lluvia. Para trabajos nocturnos, todas las limitaciones señaladas son muy importantes, ya que el mortero puede mantenerse tierno e incapaz de soportar el tránsito.

Algunas aplicaciones han fallado cuando se aplica a una temperatura muy baja o cuando se tiene condiciones de lluvia o mucha humedad. Cuando se aplica en un clima demasiado frío, el micropavimento puede fisurarse y quebrarse. Si se aplica en un clima muy caliente y seco, la superficie puede romper demasiado rápido, causando retención del agua y ocasionando un curado demasiado rápido. En climas demasiado calientes, la formulación debe cambiar para un tiempo de mezclado más largo, para lograr que el micropavimento sea aplicado en condiciones apropiadas.

2.14.2. Tolerancias en la aplicación

Las tolerancias en la aplicación del micropavimento, deben ser las siguientes:

- Después de determinar el contenido del contenido óptimo de emulsión en el Diseño, se puede aceptar una variación en $\pm 1\%$.
- El porcentaje que pasa cada tamiz o cada tamaño de agregado, no debe variar en $\pm 5\%$, de cada porcentaje de la curva granulométrica aceptada para cada diseño
- El porcentaje que pasa por cada tamiz, considerado en la franja granulométrica determinada para cada diseño, no debe ir del límite más alto al límite más bajo, de 2 mallas sucesivas.

- La consistencia del mortero, no debe variar en $\pm 0,5$ cm de acuerdo a la fórmula de trabajo, después de haber hecho los ajustes en la construcción. Esto será fácilmente verificable, ya que no deberán presentarse escurrimientos por exceso de agua o emulsión.

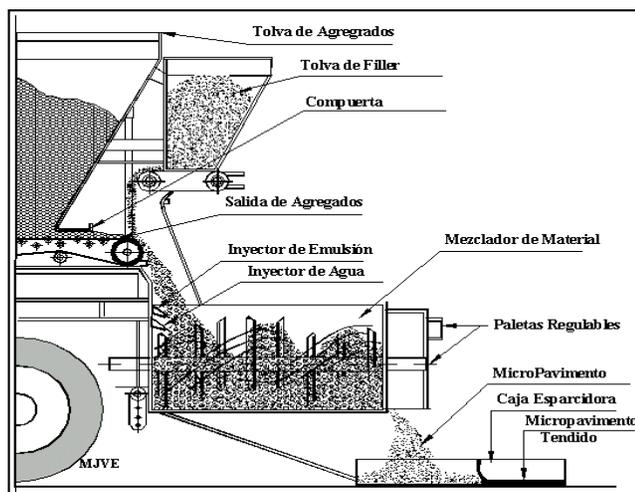
2.14.3. Equipo para aplicar micropavimento

El equipo para aplicar el micropavimento es el siguiente:

a) Máquina aplicadora de micropavimento o mortero asfáltico

La máquina mezcladora puede ser de alimentación continua, por delante y autopropulsada, para el caso de autopistas u otras vías de alto tráfico; donde la máquina es alimentada por bandas para un mezclado y aplicación continuos. Esto implica un alineamiento de todo el equipo por delante de la máquina, la cual avanza con una velocidad estable la cual es controlada por un operador de acuerdo a la calibración de la máquina, es decir del espesor de aplicación y de la apertura de salida de los materiales, sobre todo del agregado que es el determinante en estas aplicaciones. El conductor de la máquina es el responsable solo de la velocidad y del alineamiento. El operador ubicado en la parte trasera es responsable de la dosificación de los materiales, del control de aditivo en caso de ser necesario y la cantidad en porcentaje que debe ser suministrada para garantizar la aplicación de la mezcla de micropavimento.

Figura 2.8. Equipo para la colocación de capas delgadas en frío



Fuente: Norma ISSA

Existe otra máquina mezcladora autopropulsada con compartimientos destinados al almacenaje de agregado, emulsión, agua, filler y aditivo, los cuales sirven para aplicaciones finitas, según el alcance del volumen de agregado y del resto de materiales. Al igual que la máquina mezcladora de alimentación continua, este posee un tablero digital el cual registra la cantidad de cada material que se está introduciendo en la mezcla, según las aberturas del equipo.

La salida de agregado es controlada a través de una compuerta vertical la cual tiene su graduación, la misma que debe ser calibrada permanentemente cada vez que se cambie de agregado debido a la variación en peso, debido al tipo y granulometría del mismo, y si no se cambiará de agregado durante mucho tiempo, se debe realizar de igual manera una calibración por posibles desgastes del equipo, lo cual puede afectar en la dosificación.

La alimentación de emulsión está controlada mediante un Vernier, el cual puede proporcionar la exactitud deseada en laboratorio para una apertura de agregado determinada. De igual manera se realiza una calibración de la salida de emulsión cada cierto tiempo, el cual no varía mucho debido a que la densidad de la emulsión no cambia mucho, salvo aplicación de otro tipo de mezcla con otro tipo de emulsión.

La salida del mineral filler, que en la mayoría de los casos resulta ser el cemento hidráulico, es controlada a través de una perilla, la cual regula la salida según el número de vueltas de dicha perilla. También se realiza la calibración de la salida de cemento, el procedimiento para dichas calibraciones es descrito más adelante.

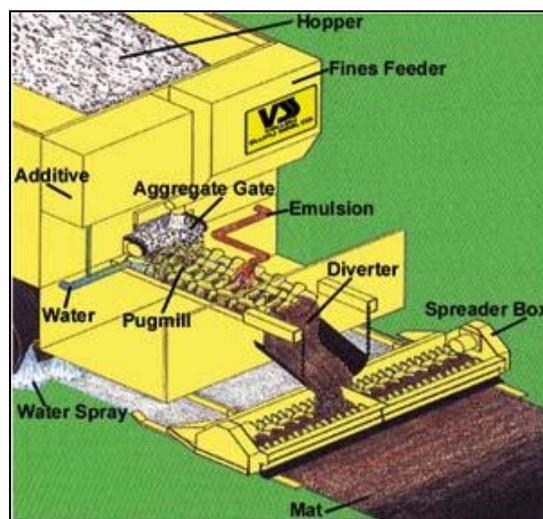
La alimentación de agua, es controlado por una válvula, la cual es abierta según la humedad que se requiera o la consistencia de la mezcla, este puede ser muy variable en una aplicación, pues el clima es un factor determinante para dicha dosificación.

Al igual que el agua el aditivo es usado según se requiera en la aplicación, pues el clima es un factor determinante para dicha dosificación; su aplicación es regulada a través de una perilla igual que la del cemento y su control es similar a dicho material.

Los trabajadores de recarpetado en la ciudad de Cochabamba vienen siendo ejecutados con una máquina mezcladora remolcada ROADSABER II, diseñado y fabricado y distribuido por la California Pavement Maintenance Company CPM, cuyas características se detallarán en el capítulo siguiente.

Sin embargo, cabe señalar que los 50.000 m², que se realizaron como prueba el año 1998, se han ejecutado con una máquina micropavimentadora “HD 10 Surry Paver”, por Akso Nobel, que es conocido como HD10.

Figura 2.9. Road Saber II (micropavimentadora)



Fuente: Manual de utilización de emulsiones asfálticas en carreteras, Shell-Colombia S.A. 1992.

b) Mezcladoras

Las mezcladoras o amasadoras de mezclas para micropavimento o mortero asfáltico, tienen longitud aproximada de 1 m a 1,3 m, son provistos de una serie de múltiples pozos unidos que permiten una unión en el amasado de los materiales, hacia una mezcla homogénea. Los materiales son mezclados en un tiempo de 5 seg a 10 seg y a una velocidad del mezclador de 300 rpm. El tiempo de mezclado total, depende de las características del sistema emulsión-agregado-agua.

Un tiempo excesivo de mezclado puede resultar en el despojo del asfalto del agregado.

Las mezcladoras de micropavimento, son impulsados con artefactos de 90 HP de potencia, a diferencia de las mezcladoras convencionales para “lechadas asfálticas Surry Seal”, los cuales operan con 30 HP.

Un mineral filler es adicionado al agregado antes de ser incluido en la mezcla. El agua y el aditivo son combinados antes de añadir a la mezcla. Todos estos ingredientes, con

mezclados antes de introducir la emulsión. El descargo de la mezcla dentro de la caja esparcidora es controlado por la cantidad de agregado fluyendo dentro de la mezcladora. La mezcla debe ser descargada dentro de la caja esparcidora en movimiento, a una producción suficiente para mantener un suministro amplio en el ancho de la caja de determinado o rastra, la que continúa mezclando aparte de distribuir el material a lo ancho de la rastra a través de tornillos sin fin que van del centro hacia los costados. La mezcladora debe ser limpiado cada vez que la operación de pavimentación se detenga, especialmente si el material se empieza a acumular.

c) Equipo esparcidor o rastra

Este equipo está destinado a sellar, nivelar y proveer la textura final del micropavimento. Es equipo completo con impulso hidráulico, capaz de remover la mezcla en un tiempo de 10 seg a 15 seg y distribuirlos fuera de la caja para una aplicación uniforme.

El ancho del equipo esparcidor puede ser ajustado desde 2,5 m hasta 5,2 m. Todo este equipo es atado en la parte trasera de la máquina micropavimentadora. Deben proveerse sellos a los lados, al frente y en la parte posterior de la caja esparcidora; El propósito de estos sellos laterales y delantero, es el de retener la mezcla dentro de la caja. El sello posterior actúa como nivel, el cual proporciona el espesor de la capa de aplicación de micropavimento, y es usualmente hecho de goma. Para proporcionar una textura mejor, en muchos casos se introduce una goma extra a la parte posterior de la caja esparcidora, en lugar de esta segunda goma, se suele utilizar con gran éxito yutes de fibra de árbol, los que por ejemplo en el proyecto de recarpetado en Cochabamba, dan buenos resultados en cuanto a textura o acabado del micropavimento.

2.15. Control de calidad en la aplicación de micropavimento

Para el control de calidad se realizan los siguientes pasos:

2.15.1. Verificación de la calibración de la máquina micropavimentadora

Como se dijo anteriormente, una condición importante para la buena ejecución del micropavimento, es realizar una buena calibración; Sin embargo, no menos importante para tener alta confiabilidad de los resultados de la calibración, debemos centrar nuestra

atención en la verificación de la calibración de la máquina micropavimentadora, la misma que deberá realizarse siguiendo los siguientes pasos:

- Después de haber calibrado la máquina y antes de iniciar el trabajo formalmente. Se deben aplicar varias franjas en obra, con prueba de aplicación del micropavimento. Esta aplicación de prueba, debe realizarse en condiciones reales de horario de trabajo y las condiciones de climatología, o sea que deben realizarse en condiciones similares a las que ofrecerá el lugar de la obra.
- A tiempo de la aplicación de estas pruebas, se tomarán muestras de la mezcla del micropavimento de la misma salida de la caja mezcladora; luego estas pruebas deberán someterse a las pruebas de control de calidad que serán recomendados más adelante.
- Si los resultados de las pruebas de control de calidad no se enmarcan en los rangos especificados o en los márgenes admisibles de los parámetros de diseño, nuevamente se aplicarán otras franjas de prueba hasta que estas se enmarquen en los parámetros indicados.
- La fórmula definitiva de trabajo, debe enmarcarse dentro de los resultados de diseño realizados para el proyecto, pero si las condiciones específicas del proyecto lo admiten, deberán cumplir con las especificaciones generales para este tipo de proyectos.
- Finalmente, si los nuevos resultados de las pruebas no cumplen con el punto anterior, deberán realizarse una nueva calibración del equipo. Pero si estos nuevos resultados cumplen con las condiciones especificadas, se deberán realizar una nueva prueba de verificación de la prueba de calibración, con el objetivo de asegurarse de los resultados esperados, las que finalmente se irán repitiendo en la obra.

2.15.2. Control de calidad en la construcción

No es necesario realizar nuevos diseños ni nuevas investigaciones sobre el comportamiento de los materiales o de la mezcla, en obra. Pero, si se llegan a cambiar algunos de los ingredientes de la mezcla, especialmente tratándose del micropavimento, será imprescindible realizar todas las pruebas de control de calidad de los materiales y diseño del micropavimento.

Sin embargo, en cualquier práctica de aplicación de micropavimento, será necesario realizar las siguientes pruebas de control de calidad:

Pruebas sobre los agregados

- **Granulometría.** A pesar de que la producción de este tipo de material depende fundamentalmente de la calibración de la planta chancadora, es necesario controlar la granulometría del agregado cada 10.000 m³ de aplicación de micropavimento.
- **Equivalente de arena.** Como se trata de la determinación de la contaminación del agregado, es necesario realizar verificaciones del equivalente de arena, por lo menos cada 6.000 m² de aplicación de micropavimento.

Pruebas sobre la mezcla

El objetivo no debe ser realizar nuevos diseños, pero es necesario que se deberá controlar la calidad de la mezcla que se está aplicando en obra.

Es muy importante que, las pruebas de control de calidad se realizan en muestras de la mezcla, tomadas a la salida de la caja mezcladora, o sea de la caída de la mezcla de la caja mezcladora a la caja de la rastra o sistema de distribución.

Los resultados de las pruebas de control de calidad, deberán enmarcarse en los resultados de diseño del micropavimento, o dependiendo de las condiciones del proyecto, pueden también simplemente cumplir con las especificaciones generales del micropavimento.

Para llevar adelante un adecuado control de calidad de la mezcla aplicada en obra, será necesario realizar las siguientes pruebas de control de calidad de la mezcla:

- **Prueba de absorción húmeda WTAT.** Probablemente sea la prueba más importante para determinar la calidad del micropavimento. Se deberá realizar una prueba de abrasión, cada que se observe cambio en las condiciones de comportamiento de la mezcla, especialmente en la rotura y el cubrimiento. Como se indicó en el desarrollo de la prueba. “Una prueba significa que deben ensayarse tres probetas o muestras elaboradas con mezclas de las mismas condiciones y características”. Además, periódicamente también deben ejecutarse pruebas WTAT, para ir controlando las características de la mezcla. De acuerdo a la experiencia y a criterios de

investigadores y grandes constructores de micropavimentos, es recomendable realizar por lo menos una prueba de abrasión, cada 2.000 m² de aplicación de micropavimento.

- **Prueba de Rueda Cargada LWT.** Se debe realizar una prueba de la rueda Cargada, cada que se observe algún brillo sobre la superficie del micropavimento, con un tiempo de curado de 3 hr, este brillo puede reflejarse solamente si existe la posibilidad de un exceso de asfalto en la mezcla. Ello amerita una verificación del contenido de emulsión en la mezcla, ya que, de no realizarse esta verificación, podría volverse a cometer dicho error. En este caso, se deben tomar mezclas de la muestra, inmediatamente después de observar este exceso de emulsión, vaciando luego un mínimo de tres probetas; los que deberán ser ensayados y cuyo promedio de los tres ensayos, será el resultado de la prueba, y luego de una comparación, se podrá sacar alguna conclusión de este resultado. Por otra parte, es necesario realizar pruebas periódicas de adherencia de arena LWT, para ir controlando las características de la mezcla. De acuerdo a la experiencia y a criterios de investigadores y grandes constructores de micropavimento, es recomendable realizar por lo menos una prueba de adherencia, cada 2.000 m² de aplicación de micropavimento.
- **Prueba de Cohesión.** Normalmente es el ensayo que se debe realizar con mayor frecuencia, especialmente aquellas veces que el curado de la mezcla se prolonga indefinidamente. Se deben elaborar probetas para ensayos de cohesión, por lo menos para romper a los 30, 60 y 180 min de curado, tres probetas por tiempos de curado. En cada prueba de cohesión, deben registrarse el tiempo de curado de la mezcla y el valor de resistencia a la torsión que se determina en el torsiómetro; cuyos valores irán paulatinamente determinando los tiempos de apertura al tráfico, que es muy importante para determinar los tiempos de apertura al tráfico, que es muy importante para determinar los periodos de interrupción del tránsito normal. Este ensayo debe realizarse especialmente cuando la mezcla tiende a ser muy fluido.
- **Prueba de determinación de la consistencia de la mezcla.** Debe verificarse la consistencia cada vez que se observe escurrimientos de mezcla o cualquier incorporación de agua en exceso, puede utilizarse cualquier método de verificación de consistencia.

- **Prueba de extracción del asfalto residual.** Puede realizarse por cualquier método, es un ensayo que debe realizar especialmente cuando la mezcla presenta poco cubrimiento o insuficiencia de asfalto, los resultados de esta prueba nos confirman la cantidad de asfalto que ingresa a la mezcla y nos permitirá verificar el diseño realizado en su componente más importante.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE

MICROPAVIMENTO

CAPÍTULO III

DISEÑO DE MICROPAVIMENTO

3.1. Introducción

La metodología de diseño de micropavimentos ha sido desarrollada por la ISSA (International Slurry Surfacing Association), que define al Micropavimento como un mortero asfáltico de calidad superior a la Lechada Asfáltica o Slurry Seal. Esto debido a que el agregado fino de la mezcla debe proceder de chancadora, ser de mejor calidad que un agregado fino zarandeado, el ligante asfáltico debe ser modificado con polímeros y utilizar aditivos para la liberación al tránsito en períodos cortos.

Para realizar la evaluación del micropavimento, tanto del diseño como de su puesta en obra, es necesario tener zonas de muestreo; cabe resaltar que no todas las vías urbanas de Tarija cuentan con micropavimento, sin embargo, se realiza el estudio en casi todas las calles o avenidas que sí cuentan con micropavimento.

3.2. Ubicación de puntos evaluados con micropavimento

Para realizar la evaluación del micropavimento, se procede a tomar muestras en 32 puntos, en diferentes calles, que son de mayor circulación. A continuación, un detalle de la ubicación satelital de cada punto evaluado.

Tabla 3.1. Ubicación de los puntos evaluados con micropavimento

Punto	Ubicación
1	Av. Panamericana entre la av. Juan de Dios Mealla y calle s/n (San Jorge II) carril del medio
2	Av. Panamericana entre la av. El Periodista y av. Ing. Renán Justiniano (San Jorge II) carril del medio
3	Av. Panamericana entre la av. Cnel. Carlos Díaz Sossa y av. Camilo Moreno carril del medio
4	Av. Panamericana y la calle 6 de Junio carril del medio
5	Av. Jaime Paz Zamora y av. Romero carril doble vía
6	Av. Jaime Paz Zamora entre pje. Serapio Martínez y pje. Suarez carril del medio
7	Av. Jaime Paz Zamora entre calle Gustavo Ruiz y calle España carril del medio

8	Av. Jaime Paz Zamora entre calle Padilla y calle Napoleón Raña carril del medio
9	Av. Víctor Paz Estensoro entre calle Issac Attie y calle Junín carril del medio
10	Av. Víctor Paz Estensoro entre calle Daniel Campos y calle Colón carril del medio
11	Av. Víctor Paz Estensoro entre calle Juan Misael Saracho y calle Campero carril del medio
12	Av. Víctor Paz Estensoro entre rotonda Puente San Martín y calle Sevilla carril derecho
13	Av. Panamericana frente al hotel Los Ceibos
14	Av. Panamericana entre calle La Madrid y calle Domingo Paz
15	Av. Panamericana casi rotonda Posta Municipal
16	Calle Ingavi entre calle Sevilla y calle Ramón Rojas
17	Calle Ramón Rojas entre calle Ingavi y calle La Madrid
18	Calle Ramón Rojas entre calle 15 de Abril y calle Virginio Lema
19	Calle Campero y calle Avaroa
20	Calle Alejandro del Carpio entre calle Campero y calle Gral. Trigo
21	Calle Alejandro del Carpio entre calle Daniel Campos y calle Colón
22	Calle Virginio Lema entre calle Colón y calle Daniel Campos
23	Calle Virginio Lema entre calle Gral. Trigo y calle Campero
24	Calle Virginio Lema entre calle Ballivián y calle Ramón Rojas
25	Calle Colón entre av. Víctor Paz Estensoro y calle Avaroa
26	Calle Colón entre calle Avaroa y calle Alejandro del Carpio
27	Calle Daniel Campos entre calle Virginio Lema y calle Alejandro del Carpio
28	Calle Daniel Campos entre calle Avaroa y av. Víctor Paz Estensoro
29	Calle Sucre entre av. Víctor Paz Estensoro y calle Avaroa
30	Calle Sucre entre calle Alejandro del Carpio y calle Virginio Lema
31	Calle Avaroa entre calle Colón y calle Daniel Campos
32	Calle Avaroa entre calle Sucre y calle Gral. Trigo

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1. Punto 1: Av. Panamericana entre la av. Juan de Dios Mealla y calle s/n, barrio San Jorge II (carril del medio).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2. Punto 2: Av. Panamericana entre la av. El Periodista y av. Ing. Renán Justiniano, barrio San Jorge II (carril del medio).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3. Punto 3: Av. Panamericana entre la av. Cnel. Carlos Díaz Sossa y av. Camilo Moreno (carril del medio).



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Diseño de mezcla en frío del micropavimento

El micropavimento es un sistema de pavimentación compuesto por emulsión asfáltica modificada con polímeros, agregados triturados, finos minerales, agua y aditivos de control en campo. Cuando se diseña y aplica apropiadamente, ha mostrado buenos resultados para mejorar las características de fricción superficial, recuperación de ahuellamientos y pequeñas irregularidades, en vías tanto de alto como de bajo volumen de tráfico.

También ha sido usado como un sello superficial para corregir irregularidades tales como pérdida de propiedades antiderrapantes (alisamiento), exudación y desprendimientos en pavimentos. Los resultados han sido variables, pero generalmente apropiados para estas aplicaciones.

El proceso de diseño de micropavimentos consiste en los siguientes pasos:

- a) Selección y pruebas de los componentes de la mezcla para verificar si cumplen con las especificaciones.
- b) Pruebas de las mezclas para determinar:
 - Mezclado y características de aplicación de los componentes mayores (emulsión y agregados), efectos del contenido de agua, de los finos y de los aditivos
 - Contenido óptimo de emulsión asfáltica.

- c) Pruebas relacionadas con el comportamiento de las muestras en las mezclas, para asegurar un buen rendimiento a largo plazo.

3.4. Caracterización de los materiales

Para realizar el diseño de una mezcla de micropavimento, es necesario conocer previamente las características del material que está compuesto. En este caso se usa una mezcla compuesta de agregados (polvo de roca y cemento portland) y emulsión asfáltica con polímero.

3.4.1. Caracterización del polvo de roca

El polvo de roca a utilizar es suministrado por la Chancadora Vargas de la ciudad de Tarija, el tamaño máximo requerido es de 3/8".

3.4.1.1. Granulometría

A partir del material traído de cantera se obtiene una muestra representativa de la arena chancada y se seca en el horno.

El material seleccionado por cuarteado se emplea para realizar la granulometría vertiendo el agregado a través de los tamices, dispuestos sucesivamente de mayor a menor, colocando al final el fondo.

Figura 3.4. Ensayo de granulometría del polvo de roca.



Fuente: Elaboración propia.

Se recupera el material retenido en cada tamiz asegurándonos manualmente de que las partículas hayan sido retenidas en el tamiz correspondiente.

Se procede a pesar el material retenido en cada tamiz, pudiendo hacerse en forma individual o en forma acumulada.

Resultado:

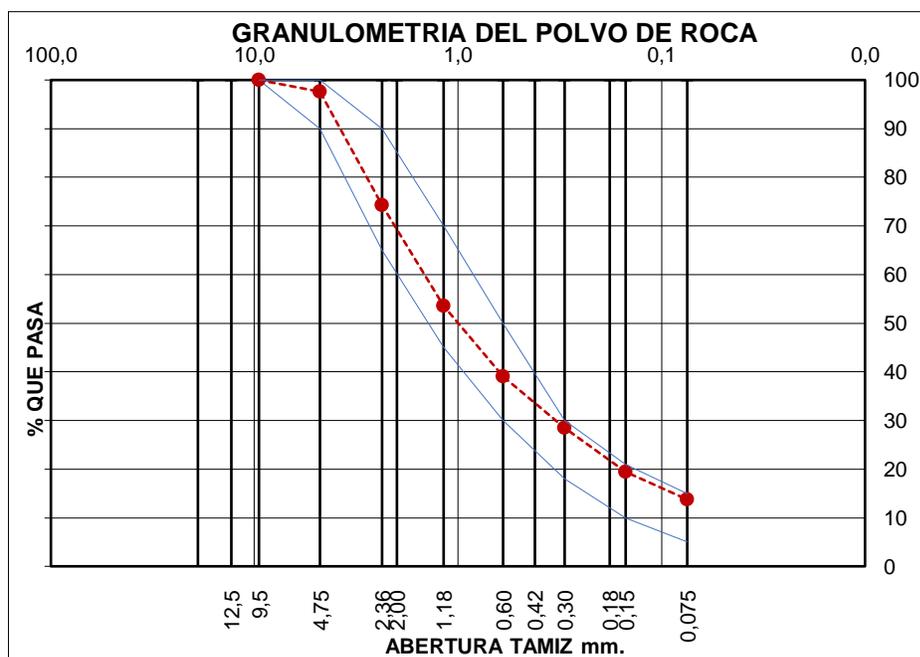
La mezcla de agregados cumple con el tipo de graduación tipo II de la ISSA, especificada para micropavimentos.

Tabla 3.2. Granulometría del polvo de roca

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	% que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
3/8"	9,50	100	100
N°4	4,75	97,6	90 – 100 (±5)
N°8	2,36	74,3	65 – 90 (±5)
N°16	1,18	53,5	45 – 70 (±5)
N°30	0,60	39	30 – 50 (±5)
N°50	0,30	28,5	18 – 30 (±5)
N°100	0,15	18,6	10 – 21 (±3)
N°200	0,075	12,9	5 – 15 (±2)

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1. Curva granulométrica del polvo de roca



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el polvo de roca cumple con las especificaciones de la norma ISSA para el diseño de una mezcla de micropavimento.

3.4.1.2. Peso específico

Peso Específico de la masa: Es la relación, a una temperatura estable, de la masa en el aire de un volumen unitario de agregado (incluyendo los poros permeables e impermeables en las partículas, pero no incluyendo los poros entre partículas); a la masa en el aire de igual volumen de agua destilada libre de gas.

Peso Específico de masa saturado superficialmente seco (SSS): Es la relación, a una temperatura estable, de la masa en el aire de un volumen unitario de agregado incluyendo la masa de agua de los poros llenos hasta colmarse por sumersión en agua por 24 hr aproximadamente (pero no incluyendo los poros entre partículas), comparada con la masa en el aire de un igual volumen de agua destilada libre de gas.

Resultado:

Tabla 3.3. Peso específico del polvo de roca

Muestra N°	P. E. A granel (gr/cm ³)	P. E. Saturado con sup. Seca (gr/cm ³)	P. E. Aparente (gr/cm ³)	% de absorción
1	2,76	2,79	2,85	1,22
2	2,76	2,79	2,85	1,18
3	2,75	2,79	2,85	1,16
Promedio	2,76	2,79	2,85	1,20

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.3. Peso unitario

Este método de ensayo permite determinar el peso unitario, también conocido como la densidad aparente, y se realiza según los parámetros de la ASTM C29 y el AASHTO T19, se puede realizar tanto en su condición compactada o suelta y calcular los huecos entre las partículas en los áridos finos, gruesos o mezclas de áridos, basada en la misma determinación. Se aplica a los áridos que no exceden las 5" (127 mm) de tamaño máximo nominal. En esta ocasión, tratándose de la realización de un micropavimento, se realiza el

ensayo de peso unitario suelto del suelo (P.U.S.S.) y el ensayo de peso unitario compactado del suelo (P.U.C.S.) según las especificaciones correspondientes.

Resultado:

Tabla 3.4. Peso unitario suelto del polvo de roca

Muestra N°	Peso unitario suelto (gr/cm ³)
1	1,54
2	1,54
3	1,54
Promedio	1,54

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Peso unitario compactado del polvo de roca

Muestra N°	Peso unitario compactado (gr/cm ³)
1	1,65
2	1,65
3	1,65
Promedio	1,65

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.4. Equivalente de arena

Este ensayo nos advierte la posible presencia de finos arcillosos en el agregado fino que podrían afectar la adherencia entre ligante-agregado e influir en su durabilidad.

El resultado es un valor representativo de la proporción y características de los finos plásticos. Nos indica la cantidad de arena limpia de nuestra mezcla de agregados finos.

Procedimiento:

Colocar solución de cloruro de calcio en el cilindro graduado, con la ayuda del sifón, a una altura de (4" ± 0.1").

Luego poner la arena en el cilindro graduado con la ayuda de un embudo.

Golpéese suavemente el fondo del cilindro con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire y remojar la muestra completamente.

Dejar en reposo durante $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$, al finalizar los 10 min, tapan el cilindro con un tapón, soltar el material del fondo.

Después de soltar el material del fondo, se procede agitar el cilindro, de forma manual o mecánicamente, luego se rellena con agua el tubo de ensayo, hasta 15”.

Se deja reposar el tubo de ensayo por 20 min, transcurrido este tiempo se mide los tubos de ensayo.

Figura 3.5. Ensayo equivalente de arena.



Fuente: Elaboración propia.

Resultado:

Tabla 3.6. Equivalente de arena del polvo de roca

Prueba	Resultado	Especificaciones
Equivalente de arena AASHTO T-176	61,3 %	$\geq 60 \%$

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.5. Desgaste de los ángeles

Esta prueba nos determina la dureza del agregado y la resistencia a la abrasión bajo el tráfico.

Procedimiento:

Los agregados a ensayar secos y limpios, con la cantidad de bolas de acero de acuerdo al método de ensayo, se colocan en la máquina de

Los Ángeles, y se programa a una velocidad constante y a 500 ciclos para el ensayo.

El ensayo se realiza a una velocidad constante e uniforme sin sobresaltos por cambios en la tensión de la corriente eléctrica.

Cumplido los 500 ciclos del ensayo se saca el material de la máquina, y se procede a tamizar los agregados en la malla N° 12, para separar los finos de los gruesos.

Los agregados retenidos en la malla N° 12, se lava, se seca en un horno a una temperatura de 100°C a 110°C, hasta peso constante, y se pesa con precisión de 1 gr.

Si el agregado está limpio, no es necesario lavar, se procede a ensayar la muestra tal y como está la muestra original.

Resultado:

Tabla 3.7. Desgaste de los ángeles del polvo de roca

Prueba	Resultado	Especificaciones
Desgaste de los Ángeles AASHTO T-96	24,2%	Máx. 30%

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.6. Durabilidad por sulfatos

El método describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados por la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.

Procedimiento:

Saturación de las muestras en la solución: Se introducirán las muestras en la solución preparada con el sulfato de sodio o sulfato de magnesio, durante 24 hr, tener cuidado que la solución cubra a los agregados ensayados no menos 1,5 cm.

Se tapan los envases para disminuir la evaporación y evitar la adición accidental de sustancias extrañas. Las muestras sumergidas en la solución se mantendrán a una temperatura de 21°C ± 1°C durante el período de inmersión. Para mantener sumergidos

los agregados muy livianos, estos se podrán cubrir con malla de alambre a las cuales se les agregará pesos y se colocarán sobre la muestra dentro del envase.

Después del periodo de saturación, se decanta los agregados y se separa la solución, se escurre por un periodo de 15 min \pm 5 min y se coloca en el horno de secar. La temperatura del horno debe estar entre 100°C a 110°C.

Se seca la muestra a la temperatura especificada hasta obtener un peso constante. Durante el período de secado, se sacan las muestras del horno y se pesan, sin enfriamiento, a intervalos de 2 hr a 4 hr, se puede considerar que se ha alcanzado el peso constante cuando dos pesadas sucesivas para cualquier muestra, realizadas como se describe arriba difieran en menos del 1% del peso de la muestra en 4 hr de secado.

Después de haber conseguido el peso constante, enfríe la muestra a la temperatura ambiente y luego se sumerge en la solución.

El lavado de la muestra debe hacerse con cuidado, no deberán golpearse entre sí, o abrasión que puedan producir una alteración de las muestras ensayadas.

Se repite el procedimiento de saturación y secado hasta completar los ciclos requeridos para completar el ensayo.

Resultado:

Tabla 3.8. Durabilidad del polvo de roca

Prueba	Resultado	Especificaciones
Durabilidad por sulfato de sodio AASHTO T-104	1,60%	Máx. 12%

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.7. Azul de metileno

Este ensayo a través de los valores de reactividad de los finos del agregado nos determina las características del emulsificante químico a utilizar en el diseño de la emulsión asfáltica y porcentaje de aditivo retardador.

Procedimiento:

Pesar 10 gr (\pm 0,05 gr) de material pasante la malla (N° 200) seco, luego colocar en un vaso de precipitación de 500 ml.

Luego poner 30 ml de agua destilada y batir con el agitador hasta tener una lechada.

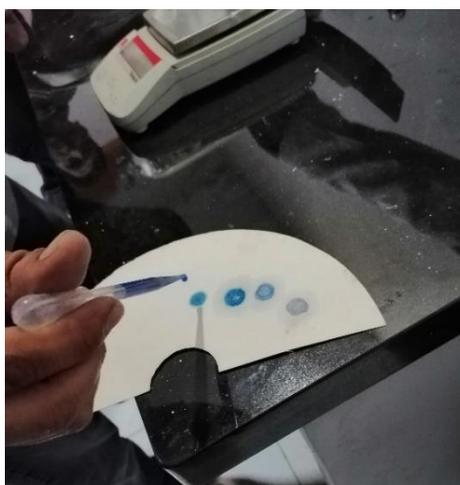
Agregar con la bureta a la lechada de suelo 0.5 ml de solución de azul de metileno y agitar durante un minuto.

Con un agitador de vidrio mojar la punta del agitador con la mezcla ensayada y dejarla caer una gota sobre el papel filtro.

Este proceso se repetirá hasta que en la gota vertida en el papel filtro se forme una aureola de color azul. Si no se ha formado alrededor de la gota una aureola azul, se continúa el ensayo adicionando a la mezcla de suelo incrementos de 0,5 ml de solución de azul de metileno, agitando durante un minuto para cada incremento.

Cuando ya se haya conseguido la aureola, se continúa agitando durante 5 min y se repite la prueba en el papel filtro, como comprobación del resultado.

Figura 3.6. Ensayo de azul de metileno.



Fuente: Elaboración propia.

Resultado:

Tabla 3.9. Azul de metileno del polvo de roca

Prueba	Resultado	Especificaciones
Azul de metileno ISSA TB-104	6,5 ml/gr	Máx. 10 ml/gr

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Caracterización del filler mineral

El filler mineral, se pueden utilizar indistintamente cemento Portland tipo I, cal hidratada, polvo de piedra caliza o ceniza volcánica, con un porcentaje máximo del 2%.

La cantidad de este relleno mineral será determinante en el diseño del micropavimento asfáltico en frío (MPAF) en laboratorio, también depende de la granulometría del agregado, el filler influye en el comportamiento de la ruptura y curado del mortero asfáltico. Como filler mineral se empleó cemento portland tipo I.

3.4.2.1. Granulometría del cemento portland

El cemento portland a utilizar en este diseño de mezcla asfáltica es de tipo IP-30, de marca FANCESA procedente de la ciudad de Sucre.

La granulometría se hace por el método seco, para no alterar las partículas del cemento Portland.

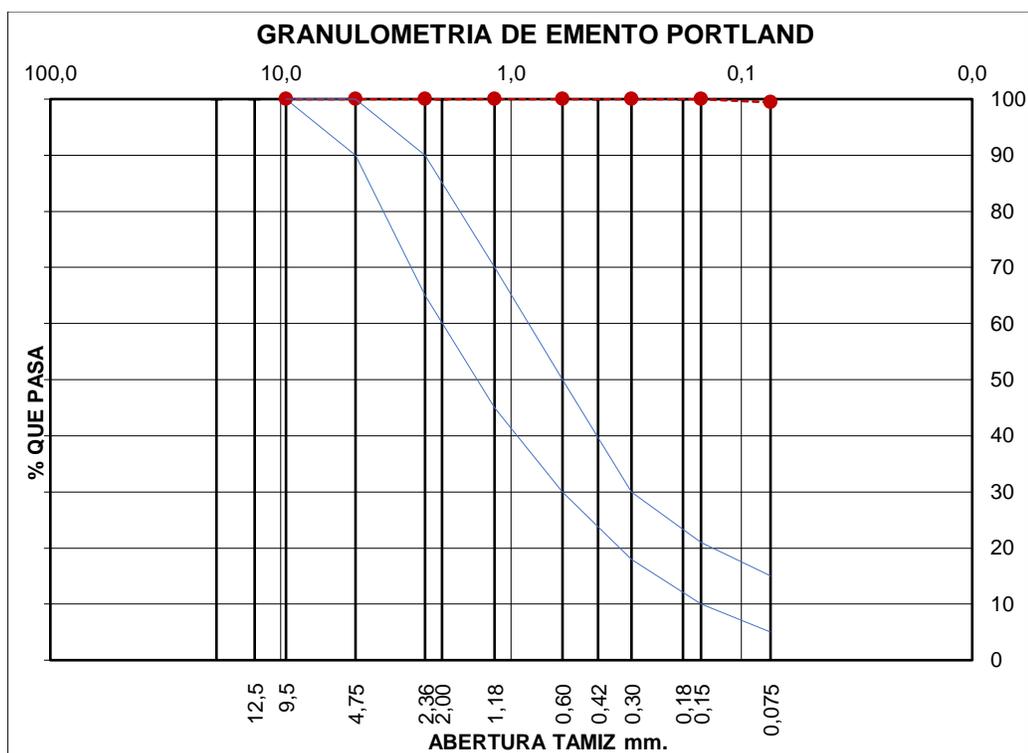
Resultado:

Tabla 3.10. Granulometría del cemento portland

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	% que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
3/8"	9,50	100,0	100
N°4	4,75	100,0	90 – 100 (±5)
N°8	2,36	100,0	65 – 90 (±5)
N°16	1,18	100,0	45 – 70 (±5)
N°30	0,60	100,0	30 – 50 (±5)
N°50	0,30	100,0	18 – 30 (±5)
N°100	0,15	100,0	10 – 21 (±3)
N°200	0,075	99,4	5 – 15 (±2)

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.2. Curva granulométrica del cemento portland



Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Caracterización de la emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica es suministrada por QUIMITEC ASFALTOS S.R.L. de la ciudad de Santa Cruz, esta emulsión asfáltica es modificada con polímero, de tipo EMULTEC RC.

3.4.3.1. Viscosidad Saybolt

La emulsión asfáltica es caracterizada con la viscosidad Saybolt Furol según la norma AASHTO T59-97 para diseño de mezclas de micropavimento.

Procedimiento:

La muestra debe homogeneizarse en un recipiente para posteriormente colocar 100 ml en un vaso de precipitado (evitar la formación de burbujas)

Sumergir el vaso en el baño de agua durante 30 min a una temperatura de 25°C o 50°C

Mezclar la muestra con el termómetro, a razón de 60 rpm aproximadamente.

Vaciar la muestra en el tubo del viscosímetro a través del tamiz N° 20, hasta que rebase el nivel del tubo de derrame.

Quitar rápidamente el tapón de la boquilla del tubo permitiendo que la muestra escurra hacia el matraz aforado.

Tomar el tiempo (en segundos) en que tarde en llenarse el matraz especial estándar hasta la marca de aforo.

El dato del tiempo tomado en segundos es el valor de la viscosidad Saybolt Furol a 25°C o 50°C

Figura 3.7. Viscosidad Saybolt de la emulsión asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

Resultado:

Tabla 3.11. Viscosidad Saybolt de la emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Viscosidad Saybolt Furol (50°C) AASHTO T59-97	24,9 seg	Máx. 70 seg

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.2. Tamizado malla N°20

El objetivo de esta prueba es determinar cuantitativamente el contenido de asfalto presente en forma de glóbulos relativamente grandes y que pueden obstruir el espesor y la uniformidad de la partícula de asfalto dentro de la emulsión, sobre las partículas del agregado pétreo; además de que el tamaño de los glóbulos, indican buena o mala estabilidad de la emulsión para permanecer en ese estado. Los glóbulos grandes indican

que la emulsión va a tener una tendencia a sedimentarse y por lo tanto puede causar su rompimiento.

Procedimiento:

Pesar el tamiz N° 20 con fondo y tapa; valor que se denomina peso tara Pt.

Una muestra de emulsión homogeneizada se vierte en el vaso de 1000 cc.

Tamizar la muestra con la finalidad de retener los glóbulos mayores de 8 micras.

Para evitar reacciones químicas se recomienda mojar el tamiz con la misma solución jabonosa de la emulsión asfáltica. Posteriormente lavar el tamiz con agua acidulada.

Colocar el fondo y la tapa para, secar el conjunto en el horno durante 2 hr a 100°C, después sacar del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente, y luego pesar (Pr).

Resultado:

Tabla 3.12. Tamizado por la malla N°20 de la emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Tamizado malla N°20 AASHTO T59-97	0,01%	Máx. 0,1%

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.3. Sedimentación

El objetivo de esta prueba es obtener un índice de la tendencia que los glóbulos de asfalto tienen para sedimentarse durante un almacenamiento prolongado de las emulsiones asfálticas.

El ensayo de sedimentación ayuda a determinar la aceptación o el rechazo de una emulsión asfáltica, ya que no da un parámetro del tiempo de fabricación, de la calidad de emulsificación, etc.

Procedimiento:

Determinar el residuo asfáltico R.A. de la emulsión que se va a ensayar.

Introducir la emulsión en la probeta hasta la marca de 500 ml.

Después de 5 días, vaciar la probeta por medio del tubo insertado en la probeta a la altura de los 50 ml.

Vaciar la emulsión remanente (50 ml) y determinar su residuo asfáltico Ri.

La diferencia se puede expresar como sigue $%S = \%R_o - \%R_i$

Resultado:

Tabla 3.13. Sedimentación de la emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Sedimentación, 5 días AASHTO T59-97	2,4 %	Máx. 5 %

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.4. Carga eléctrica de la partícula

La prueba de la carga eléctrica de la partícula, tiene por objeto identificar las emulsiones a través de la polaridad eléctrica de sus glóbulos de asfalto. Cuando dichos glóbulos tienen carga eléctrica negativa, las emulsiones se clasifican como aniónicas, y cuando tienen carga eléctrica positiva se clasifican como emulsiones catiónicas.

Procedimiento:

Se necesita un aparato que proporcione una corriente eléctrica de 12 V, provisto de una resistencia variable y un miliamperímetro. También se necesita dos electrodos formados cada uno por una placa de acero inoxidable de 100 mm de longitud, 25 mm de ancho y 3 mm de espesor, aproximadamente; los electrodos deben estar aislados entre sí y sostenidos rígidamente y paralelamente, distanciados uno del otro, 13 mm. Además, se necesita un vaso precipitado de vidrio 150 cm³ a 250 cm³ de capacidad y un cronómetro.

Figura 3.8. Ensayo carga eléctrica de la emulsión asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

La prueba inicia colocando en el vaso precipitado la emulsión asfáltica, luego se sumergen los electrodos 25 cm de profundidad, sin tocar fondo.

Posteriormente se somete a pruebas eléctricas por un tiempo de 30 min, luego se verifican los electrodos; si los glóbulos de asfalto se han depositado en el cátodo entonces la emulsión asfáltica tiene carga positiva, y si los glóbulos de asfalto se han depositado en el ánodo entonces la emulsión asfáltica tiene carga negativa.

Resultado:

Tabla 3.14. Carga de las partículas de la emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Carga de partículas AASHTO T59-97	Positiva	Positiva

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.5. PH

La prueba del potencial hidrógeno (pH) en las emulsiones asfálticas, proporciona un valor numérico empleado para expresar el grado de acidez o de alcalinidad de la fase acuosa y representa la concentración de iones de hidrógeno (H^+) que está contenida en ellas.

Además, la prueba sirve para identificar el tipo de emulsión como aniónicas o catiónica tomando en cuenta que las emulsiones catiónicas son de tipo ácido, y las aniónicas de tipo básico; también se puede tener indicaciones respecto al comportamiento de las emulsiones con los materiales pétreos.

Procedimiento:

El procedimiento consiste en colocar en un recipiente una muestra de emulsión asfáltica, en donde se sumergen los electrodos de un potenciómetro que registra la concentración de iones de hidrógeno (H^+), expresándola en unidades de pH.

Resultado:

Tabla 3.15. pH de la emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
pH AASHTO T-200	3,26	Máx. 6,5

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.6. Residuo por evaporación

Esta prueba determina el contenido de residuo asfáltico por evaporación en las emulsiones asfálticas, o sea, la proporción de material asfáltico que se obtiene al someter a la emulsión a un proceso de evaporación en un horno. En el residuo así obtenido se pueden efectuar pruebas de penetración y ductilidad, aun cuando en general den valores más bajos que los determinados en el residuo obtenido por destilación; sin embargo, estos resultados pueden servir para dar una idea de las características de dicho residuo.

Figura 3.9. Ensayo residuo por evaporación.



Fuente: Elaboración propia.

Resultado:

Tabla 3.16. Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Residuo por evaporación AASHTO T59-97	63,9 %	Mín. 62 %

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.7. Penetración del residuo

La prueba de penetración es otro método para cuantificar la consistencia del asfalto, también utilizada como guía y para caracterizar asfaltos por grado de penetración. En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos. Los ensayos

de penetración fueron utilizados dentro de las primeras metodologías de clasificación de asfaltos y aun se siguen utilizando.

Procedimiento:

La prueba de penetración se realiza a una temperatura de 25°C al residuo de evaporación. Este dato proporciona una estimación del comportamiento de la emulsión asfáltica posterior a la etapa de evaporación, se mide la penetración a 25°C, con un peso de 100 gr, por un tiempo de 5 seg de la emulsión asfáltica.

Figura 3.10. Equipo para el ensayo de penetración al residuo de emulsión asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

Resultado:

Tabla 3.17. Penetración del residuo de emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Penetración del residuo, a 25°C, 100 gr, 5 seg AASHTO T-49	52 (0,1 mm)	45 – 150 (0,1 mm)

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.8. Punto de ablandamiento del residuo

El punto de ablandamiento de los materiales asfálticos, generalmente no se efectúa en un momento o una temperatura definidos. A medida que esta aumenta, en forma gradual e imperceptible, cambian de un estado frágil o excesivamente espeso o de flujo lento, a un

estado líquido más blando y menos viscoso. Por este motivo, la determinación de la temperatura de ablandamiento se debe hacer bajo condiciones no arbitrarias y exactamente definidas por el método, para que los resultados obtenidos puedan ser comparables.

Esta prueba se realiza con el equipo de anillo y bola y el líquido de baño es agua por tener un punto de ablandamiento aproximadamente menor a 80°C.

Resultado:

Tabla 3.18. Punto de ablandamiento del residuo de emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Punto de ablandamiento AASHTO T-53	61°C	Mín. 55°C

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.9. Viscosidad Brookfield del residuo

La viscosidad Brookfield del residuo de evaporación de la emulsión asfáltica, permite medir las propiedades del asfalto a altas temperaturas, para determinar las características de mezclado y compactación.

Procedimiento:

El residuo de la evaporación de la emulsión asfáltica es vaciado en una cámara de calentamiento; un Spindle estándar es insertado en el soporte rotatorio, la fuerza requerida para rotar el Spindle es la medida de la viscosidad.

Se usa este método en el laboratorio o en campo para determinar las temperaturas de mezclado y compactación, además de asegurar que no se presenten problemas de manejo y bombeo, como resulta con los asfaltos modificados.

Resultado:

Tabla 3.19. Viscosidad Brookfield del residuo de emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Viscosidad Brookfield, A 135 °C, SP 21, 20rpm AASHTO T-316	2320 cP	Mín. 600 cP

Fuente: Elaboración propia

3.4.3.10. Recuperación elástica del residuo

Este método se utiliza en los asfaltos modificados, que comprenden los cementos y emulsiones asfálticas modificadas. El ensaye se efectúa a una temperatura de $13^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ y a una velocidad de $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$. Para materiales bituminosos el astoméricos se considera una elongación inicial de 20 cm. para la muestra.

Resultado:

Tabla 3.20. Recuperación del residuo de emulsión asfáltica

Prueba	Resultado	Especificaciones
Recuperación elástica, a 25°C , 20 cm AASHTO T-301	67%	Mín. 60%

Fuente: Elaboración propia

3.5. Diseño granulométrico de la mezcla

La mezcla de polvo de roca y el cemento Portland, debe ajustarse a alguna de las gradaciones, establecidos en la tabla 3.21.

Tabla 3.21. Especificaciones de la granulometría de micropavimento

Tipo	I	II	III
Tamaño de tamiz	% pasa	% pasa	% pasa
3/8" (9,50 mm)	100	100	100
Nº 4 (4,75 mm)	100	90-100	70-90
Nº 8 (2,36 mm)	90-100	65-90	45-70
Nº 16 (1,18 mm)	65-90	45-70	28-50
Nº 30 (0,60 μm)	40-60	30-50	19-34
Nº 50 (0,30 μm)	25-42	18-30	12-25
Nº 100 (0,15 μm)	15-30	10-21	7-18
Nº 200 (0,075 μm)	10-20	5-15	5-15

Fuente: ISSA A 105

(*) La gradación tipo I, provee máxima penetración en las fisuras y buenas propiedades de sellado, también funciona como un pre-tratamiento de una capa de mezcla asfáltica en caliente. Tiene un buen comportamiento en áreas de baja densidad de tráfico.

(*) La gradación tipo II, protege al pavimento subyacente de la oxidación y del daño por humedad y mejoran la fricción superficial. También se pueden corregir casos de desprendimiento severo y se emplean en pavimentos con tráfico moderado.

(*) La gradación tipo III, se emplea en aplicaciones voluminosas ($8,2 \text{ kg/m}^2$ – $13,6 \text{ kg/m}^2$) y altos valores de fricción superficial. Para carreteras de tráfico pesado.

Estos tipos de gradación permiten realizar una aplicación directa con el uso de tamaño máximo de agregados hasta de $3/8''$. De acuerdo a su tamaño, el espesor del micropavimento puede ser:

Tipo I: (espesor de 4 mm a 15 mm)

Tipo II: (espesor de 6 mm a 20 mm)

Tipo III: (espesor de 10 mm a 30 mm)

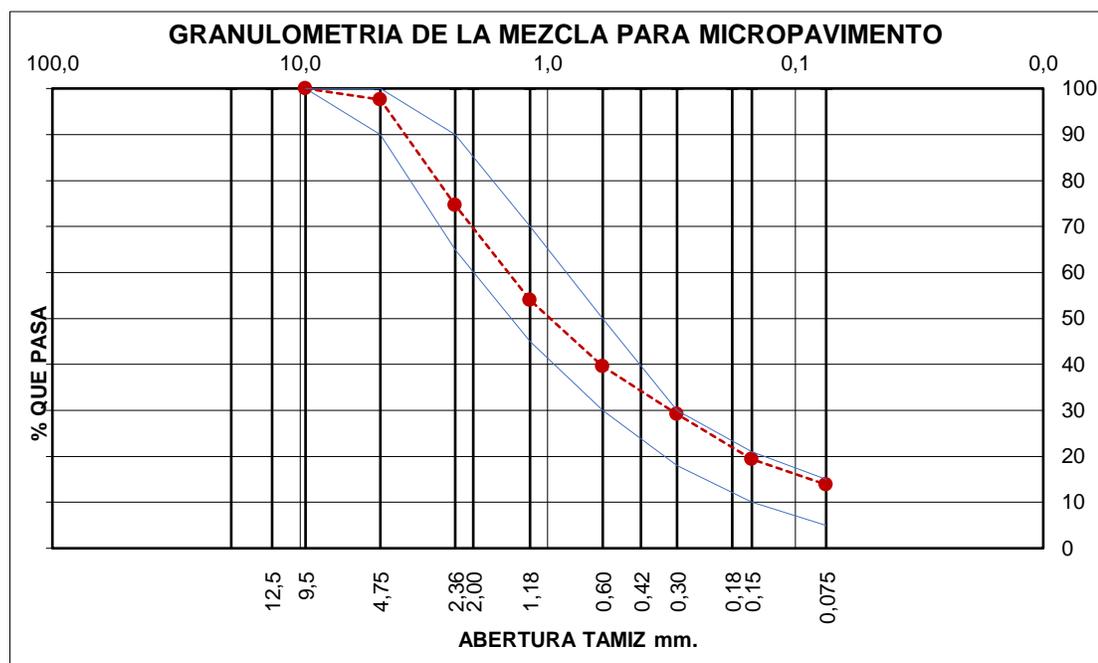
Para este estudio la mezcla fue diseñada con la gradación tipo II, porque los pavimentos de la ciudad de Tarija cuentan con un tráfico moderado.

Tabla 3.22. Granulometría de la mezcla del micropavimento

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	99,00 % polvo de roca $3/8''$	1,00 % cemento Portland	100% del % que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
$3/8''$	9,50	100,0	100,0	100,0	100
N°4	4,75	97,6	100,0	97,6	90 – 100 (± 5)
N°8	2,36	74,3	100,0	74,6	65 – 90 (± 5)
N°16	1,18	53,5	100,0	54,0	45 – 70 (± 5)
N°30	0,60	39,0	100,0	39,6	30 – 50 (± 5)
N°50	0,30	28,5	100,0	29,2	18 – 30 (± 5)
N°100	0,15	18,6	100,0	19,4	10 – 21 (± 3)
N°200	0,075	12,9	99,4	13,8	5 – 15 (± 2)

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.3. Curva granulométrica de la mezcla de micropavimento



Fuente: Elaboración propia

3.6. Ensayos para determinar el contenido de emulsión asfáltica en laboratorio

Existen dos métodos para determinar el contenido de emulsión asfáltica:

3.6.1. Abrasión por vía húmeda WTAT

El ensayo de abrasión por vía húmeda (WTAT), permite determinar, a partir de la adherencia de la arena a la mezcla de micropavimento, el contenido mínimo de asfalto residual de una mezcla diseñada para micropavimento. Se rige según la norma ISSA TB-100.

Procedimiento:

Se pesa el agregado a utilizar en la mezcla, por la malla N°4, se pesa 800 gr para la elaboración de las muestras, y se preparan diferentes muestras con diferentes porcentajes de emulsión y de agua, para nuestro diseño colocaremos aros de acero de 10 mm de espesor por tratarse de una granulometría del tipo II y de un diámetro de 280 mm.

- Secar las muestras a 60°C, en horno por un tiempo no menor de 15 hr.
- Después de curadas las muestras, se pone a enfriar a temperatura ambiente para poder obtener su peso P1.

- La muestra a ensayar se sumerge entre 60 min a 75 min en agua a la temperatura de 25°C
- Se ensaya la muestra sumergida, por 5 min en el equipo de abrasión, a una temperatura del agua de 25°C.
- La muestra ensayada se lava, para poder retirar los residuos de arena suelta y se pone a secar a una temperatura de 60°C al horno, luego poner a enfriar a temperatura ambiente y obtener el peso de la muestra P2.
- La cantidad máxima de peso que puede perder la muestra es de 538 gr/m² caso contrario se tiene que rediseñar el micropavimento.

Procesamiento de datos:

Con los resultados obtenidos en cada una de las muestras se grafica una curva, donde el porcentaje de residuo asfáltico o emulsión asfáltica va en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas el valor de pérdida por abrasión o adherencia de la arena.

Recomendaciones:

Las muestras deberán ser mezcladas homogéneamente, y los componentes de la misma tendrán que ser los mismos porcentajes del diseño, el tiempo de mezcla no debe ser menor de 3 minutos. Después de esparcir uniformemente dentro del aro de acero la mezcla de micropavimento, se retira el aro al minuto de ser moldeado.

Para determinar el factor de cálculo de perdida por abrasión, tiene que ver con el tipo y modelo de equipo que se está usando.

Figura 3.11. Ensayo de abrasión por vía húmeda WTAT.



Fuente: Elaboración propia.

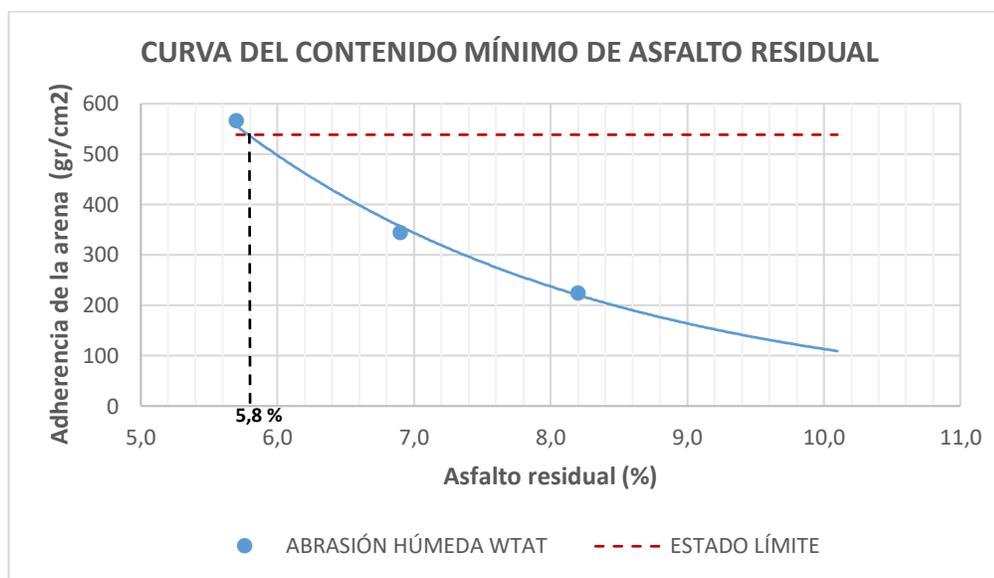
Resultados:

Tabla 3.23. Adherencia de la arena por abrasión vía húmeda

Muestra	Emulsión asfáltica (%)	Asfalto residual (%)	Cemento portland (%)	Adherencia de la arena (gr/m ²)
1	9,0	5,7	1,0	566
2	11,0	6,9	1,0	344
3	13,0	8,2	1,0	224
4	14,0	8,8	1,0	-
5	15,0	9,5	1,0	-
6	16,0	10,1	1,0	-
Estado Límite (máx.) =				538

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.4. Contenido mínimo de asfalto residual por abrasión húmeda WTAT



Fuente: Elaboración propia

Contenido mínimo de asfalto residual = 5,8 %

3.6.2. Rueda cargada LWT

El ensayo de la rueda cargada (LWT), se rige en la norma ISSA TB-109, y permite determinar, a partir de la adherencia de la arena a la mezcla de micropavimento, el contenido máximo de asfalto residual de una mezcla diseñada para micropavimento.

Procedimiento:

- Las muestras para ensayar deberán ser elaboradas con 300 gr de agregados, para cada punto de prueba.
- Es necesario elaborar varios puntos de prueba con diferentes contenidos de emulsión asfáltica y de agua.
- El molde a utilizar debe ser de un espesor 25% mayor al tamaño máximo del agregado, los moldes son de forma rectangular de 5 cm de ancho por 37,5 cm de largo.
- Según norma dejar curar en el horno a 60°C, por un tiempo de 12 hr y obtener peso constante.
- Cumplido el tiempo de curado se coloca en el equipo de Rueda Cargada, para ser compactada con una carga de 57 kg. Se somete a la muestra a 1000 ciclos, a 25°C.
- Terminada de pasar la rueda cargada, la muestra se retira del equipo se lava y se seca en el horno a peso constante a 60°C, obtenemos el peso P1.
- Se coloca arena de Ottawa, calentada a 82°C un peso de 200 gr. sobre la muestra ensayada.
- Se repite el ensayo de la muestra con la arena de Ottawa, solo con 100 ciclos con la rueda cargada.
- Concluido el ensayo se saca la muestra del equipo se limpian los granos de arena que no se han adherido con una escobilla de cerdas suaves; de este proceso obtenemos el peso P2.
- Por diferencia de pesos de P1 y P2, obtenemos la cantidad de arena de Ottawa adherida a la muestra.
- Al final del ensayo, nuestro valor de adherencia de arena en la muestra no debe ser mayor de 538 gr/m².

Procesamiento de datos:

Los resultados obtenidos por cada muestra ensayada nos dan los valores para proyectar una curva, en el eje de las abscisas se pone el porcentaje del residuo asfáltico y en el eje de las ordenadas la adherencia de la arena.

Figura 3.12. Muestra después del ensayo rueda cargada LWT.



Fuente: Elaboración propia.

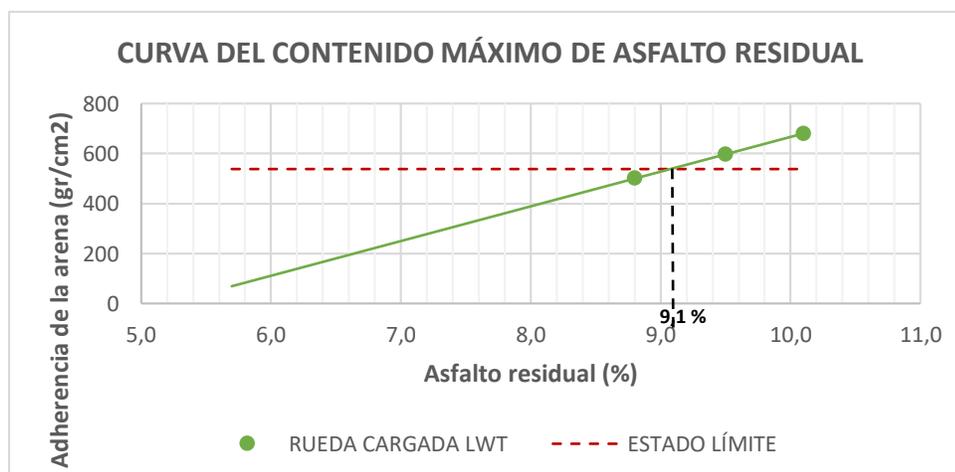
Resultados:

Tabla 3.24. Adherencia de la arena con la rueda cargada

Muestra	Emulsión asfáltica (%)	Asfalto residual (%)	Cemento portland (%)	Adherencia de la arena (gr/m ²)
1	9,0	5,7	1,0	-
2	11,0	6,9	1,0	-
3	13,0	8,2	1,0	-
4	14,0	8,8	1,0	500
5	15,0	9,5	1,0	596
6	16,0	10,1	1,0	680
Estado límite (máx.) =				538

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.5. Contenido máximo de asfalto residual por rueda de carga LWT



Fuente: Elaboración propia

Contenido máximo de asfalto residual = 9,1 %

3.7. Contenido óptimo de emulsión asfáltica

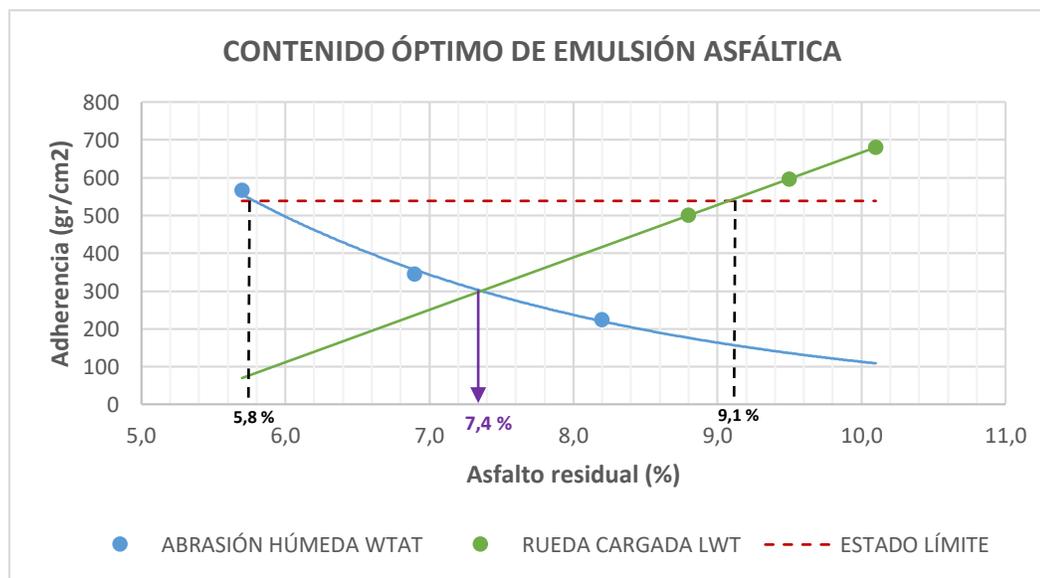
Con los datos obtenidos de los ensayos de rueda cargada y abrasión por vía húmeda, se interceptan las dos curvas, se traza una línea horizontal con el valor del peso máximo, y según lo especificado, se entrecruzan las dos curvas en un punto, desde ahí, se proyecta una vertical, y se define el contenido óptimo de asfalto residual, este debe seguir los criterios ISSA.

Criterio 1: El contenido óptimo de asfalto residual será el valor del asfalto residual en porcentaje (eje x), donde se haya producido un punto de intersección a partir de la proyección de las líneas WTAT y LWT.

Criterio 2: El contenido óptimo de asfalto residual será el valor promedio entre el contenido mínimo y máximo del asfalto residual más el 3% de la diferencia de dichos valores.

Aplicando los criterios ISSA, tenemos la siguiente gráfica:

Gráfica 3.6. Criterios para el contenido óptimo de asfalto residual



Fuente: Elaboración propia

Si se observa el gráfico 3.6. podemos obtener los siguientes valores, según cada criterio.

Valor con el criterio 1:

De la gráfica se obtiene = **7,40%**

Valor con el criterio 2:

Contenido mínimo de asfalto residual = 5,80 %

Contenido máximo de asfalto residual = 9,10 %

Promedio de ambos Contenidos = 7,45 %

3% de la diferencia (9.10% - 5.80%) = 0,10 %

Total (7.45% + 0.10%) = **7,55 %**

Los resultados de ambos criterios son aproximados entre sí, sin embargo, si tomamos en cuenta la parte económica, entonces el 7,40% proporciona una mezcla a bajo costo y cumple las especificaciones de calidad. Por lo tanto, el contenido óptimo de asfalto residual es igual a **7,40%**.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DEL MICROPAVIMENTO

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DEL MICROPAVIMENTO

4.1. Introducción

Universalmente, a partir de la década del 90, la tecnología de las emulsiones ha tenido una gran evolución, resultado de ello es el empleo de emulsiones modificadas con polímeros para aplicación de tratamientos asfálticos superficiales (TAS), micropavimentos asfálticos en frío (MPAF), mezclas asfálticas emulsionadas modificadas con polímeros (MAEP) para bases y carpetas de rodadura, etc.

Sin embargo, para conocer sus resultados y dar fiabilidad a posteriores aplicaciones es importante realizar una evaluación de calidad de diseño, durante la puesta en obra y durante el tránsito vehicular.

Este trabajo muestra precisamente una evaluación que se realiza al diseño de la mezcla de micropavimento, su puesta en obra y el acabado final con la que se transita actualmente por las vías urbanas de la ciudad de Tarija.

El micropavimento aplicado, es una mezcla en frío compuesta por polvo de roca, cemento Portland como fíller, emulsión asfáltica modificada con polímeros y agua; con una consistencia semisólida, distribuida uniformemente sobre una superficie previamente preparada, a temperatura ambiente y aplicada en espesores milimétricos, según el tipo II, desde 6 mm hasta 20 mm.

4.2. Evaluación de la mezcla del micropavimento (MPAF)

Para realizar una evaluación a la mezcla del micropavimento asfáltico en frío (MPAF), es necesario conocer los resultados de laboratorio antes de su aplicación y los resultados durante su puesta en obra. Es decir, se realiza una evaluación de control de calidad del diseño de la mezcla del micropavimento, como se detalla a continuación:

4.2.1. Resultados de la mezcla de MPAF de diseño

Los resultados de diseño de la mezcla de micropavimento asfáltico en frío (MPAF), surgen a partir de un estudio de caracterización de los componentes que conforman la mezcla, con estos valores se aplican criterios para determinar el diseño final de MPAF que va más

acorde a las necesidades y circunstancias que presenta y necesitan las vías urbanas de Tarija.

En la tabla 4.1. se puede observar los resultados de la caracterización de los agregados, como ser el polvo de roca y el cemento Portland. Estos valores fueron comparados con la norma ISSA, cumpliendo las especificaciones de calidad.

Tabla 4.1. Resultados de caracterización de los agregados

Granulometría	% que pasa tamiz N° 200							
	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
Polvo de roca	100	97,6	74,3	53,5	39	28,5	18,6	12,9
Cemento Portland	100	100	100	100	100	100	100	99,4
Peso específico	2,85 gr/cm ³							
Absorción	1,20 %							
Peso unitario suelto	1,54 gr/cm ³							
Peso unitario compactado	1,65 gr/cm ³							
Equivalente de arena	61,30 %							
Desgaste de los ángeles	24,20 %							
Durabilidad por sulfatos	1,60 %							
Azul metileno	6,50 ml/gr							

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la tabla 4.2. se observan los resultados de la caracterización de la emulsión asfáltica modificada con polímero, de nombre EMULTEC RC, con características de catiónica de rotura rápida. Los valores obtenidos cumplen con todas las especificaciones de la norma ISSA, como se detalla en el capítulo III.

Tabla 4.2. Resultados de caracterización de la emulsión asfáltica

Viscosidad Saybolt	24,9 seg
Tamizado malla N° 20	0,01 %
Sedimentación	2,4 %
Carga eléctrica de la partícula	Positiva
pH	3,26
Residuo por evaporación	63,9 %
Penetración del residuo	52 (0,1mm)
Punto de ablandamiento del residuo	61 °C
Viscosidad Brookfield del residuo	2320 cP
Recuperación elástica del residuo	67 %

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente con estos valores se procede a seleccionar un porcentaje de participación de los agregados en la mezcla (99% polvo de roca y 1% de cemento Portland), para así cumplir con la granulometría tipo II según tabla 3.21., quedando de la siguiente forma:

Tabla 4.3. Granulometría final de la mezcla

Tamiz	Total del % que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
3/8"	100	100
N°4	97,6	90 – 100 (±5)
N°8	74,6	65 – 90 (±5)
N°16	54	45 – 70 (±5)
N°30	39,6	30 – 50 (±5)
N°50	29,2	18 – 30 (±5)
N°100	19,4	10 – 21 (±3)
N°200	13,8	5 – 15 (±2)

Fuente: Elaboración propia

Con esta granulometría se determina el espesor de la carpeta de micropavimento que debe estar entre 6 mm a 20 mm de altura.

Una vez conocidas las características de los materiales que componen la mezcla del MPAF, se realizaron dos estudios fundamentales para determinar el contenido óptimo de asfalto residual de una mezcla asfáltica.

1° El ensayo de adherencia de la arena por el método de la abrasión vía húmeda (WTAT), que permitió determinar los valores mínimos asfalto residual en gr/m^2 .

2° El ensayo de adherencia de la arena por el método de rueda cargada (LWT), que permitió determinar los valores máximos de asfalto residual en gr/cm^2 .

Para ambos grupos de resultados, hay algunos resultados que no cumplen con la condición que deben ser menor al estado límite de 538 gr/cm^2 , como se observa en la tabla 4.4.

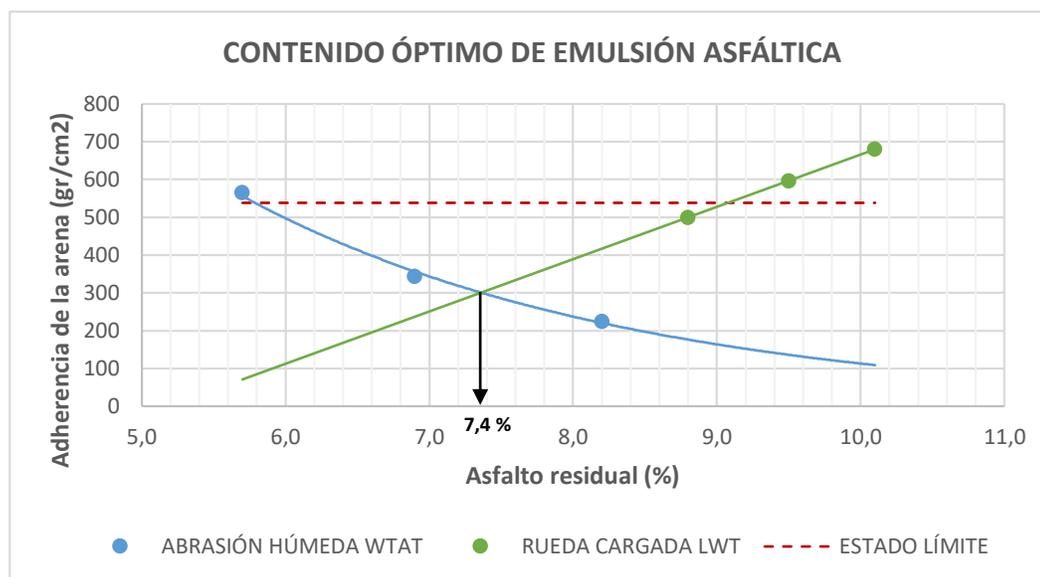
Tabla 4.4. Valores máximos y mínimos de adherencia de la arena.

Muestra	Emulsión asfáltica (%)	Asfalto residual (%)	Adherencia de la arena "abrasión húmeda WTAT – mín." (gr/m^2)	Adherencia de la arena "rueda cargada LWT– máx." (gr/m^2)
1	9,0	5,7	566	-
2	11,0	6,9	344	-
3	13,0	8,2	224	-
4	14,0	8,8	-	500
5	15,0	9,5	-	596
6	16,0	10,1	-	680
Estado límite =			< 538	< 538

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente con estos valores se analizaron dos criterios de la norma ISSA optando por la más económica, que consiste en la proyección las líneas de tendencia de WTAT y LWT para que se intersecten entre sí y generen un punto, este punto es leído en eje de las abscisas, el cual nos proporciona el contenido óptimo de residuo asfáltico igual a 7,4%, como se observa en el gráfico 4.1.

Gráfico 4.1. Contenido óptimo de asfalto residual



Por lo tanto, si observamos la gráfica 4.1. se puede determinar que con el 7,4% de asfalto residual se obtiene una adherencia de la arena de 300 gr/m² y evidenciar que cumple con las especificaciones al estar por debajo del límite máximo de 538 gr/m².

4.2.2. Resultados de la mezcla de MPAF en obra

Para realizar un control de calidad a la mezcla de MPAF durante la puesta en obra, se procedió a tomar 3 muestras in situ de la mezcla que se estaban colocando en las avenidas: av. Víctor Paz, av. Jaime Paz y av. Panamericana, con previa aprobación de la unidad contratante de la empresa encargada del proyecto, en este caso la Alcaldía Municipal de la Provincia Cercado.

Las tres muestras fueron tomadas en las siguientes progresivas de la av. Víctor Paz, desde la rotonda del puente Bicentenario hacia el puente San Martín.

Muestra 1: 0+000 a 0+400 km.

Muestra 2: 0+400 a 0+800 km.

Muestra 3: 0+800 a 1+200 km.

Figura 4.1. Maquinaria y equipo durante el tendido de micropavimento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2. Acabado final del micropavimento.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1. Resultados granulométricos

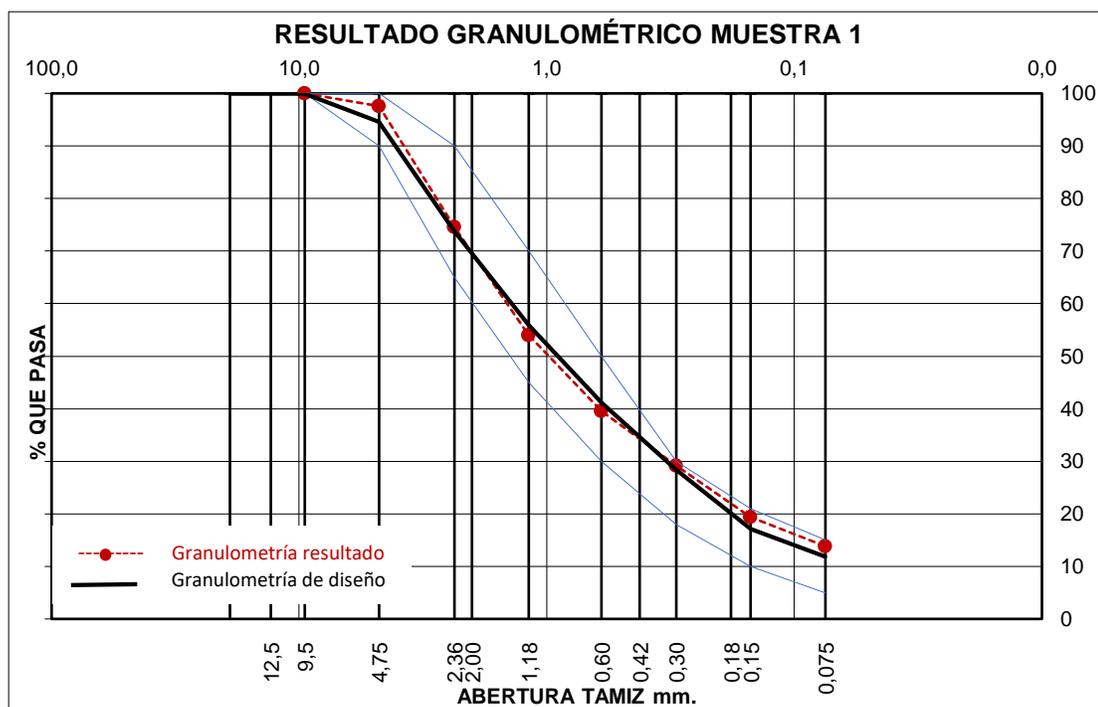
Para comprobar el estado granulométrico que se emplea en obra se obtienen los siguientes resultados de tres muestras tomadas aleatoriamente.

Tabla 4.5. Resultado granulométrico de muestra 1

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	% que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
3/8"	9,50	100,0	100
N°4	4,75	94,6	90 – 100 (±5)
N°8	2,36	73,8	65 – 90 (±5)
N°16	1,18	55,9	45 – 70 (±5)
N°30	0,60	41,1	30 – 50 (±5)
N°50	0,30	28,4	18 – 30 (±5)
N°100	0,15	17,1	10 – 21 (±3)
N°200	0,075	11,9	5 – 15 (±2)

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.2. Resultado granulométrico de la muestra 1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6. Resultado granulométrico de muestra 2

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	% que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
3/8"	9,50	100,0	100
N°4	4,75	96,7	90 – 100 (±5)
N°8	2,36	73,5	65 – 90 (±5)
N°16	1,18	56,0	45 – 70 (±5)
N°30	0,60	41,2	30 – 50 (±5)
N°50	0,30	28,4	18 – 30 (±5)
N°100	0,15	17,1	10 – 21 (±3)
N°200	0,075	11,8	5 – 15 (±2)

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.3. Resultado granulométrico de la muestra 2

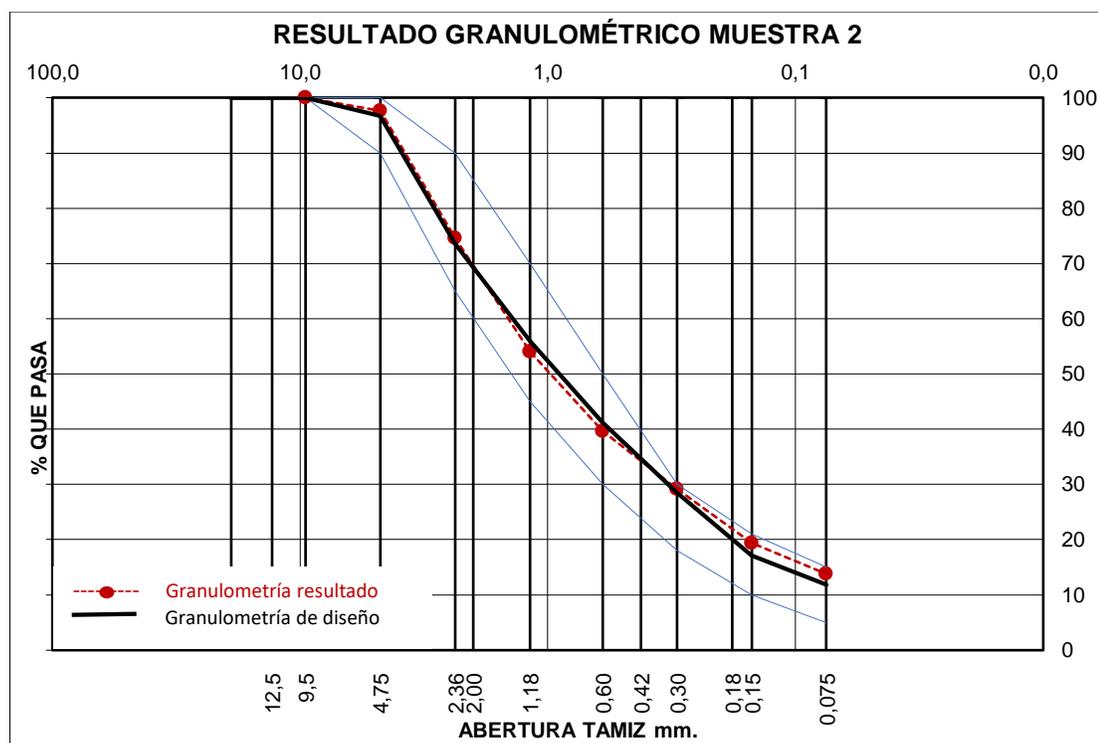
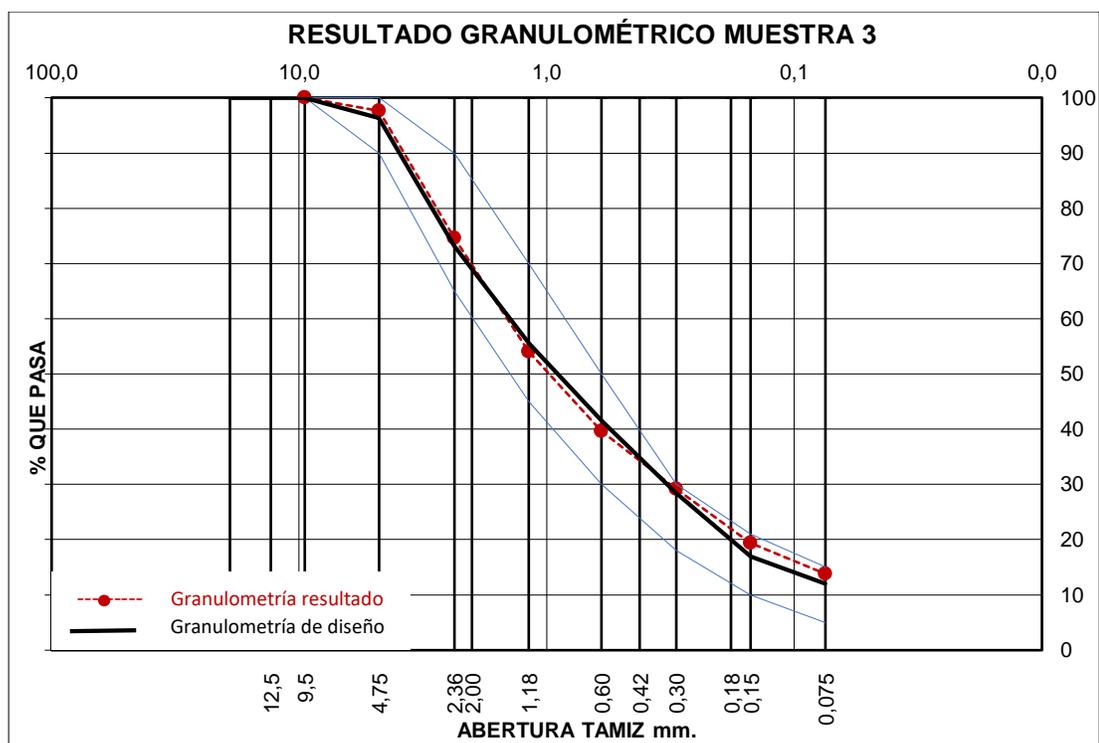


Tabla 4.7. Resultado granulométrico de muestra 3

Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	% que pasa tamiz N°200	Especificaciones ISSA tipo II
3/8"	9,50	100,0	100
N°4	4,75	96,3	90 – 100 (±5)
N°8	2,36	73,2	65 – 90 (±5)
N°16	1,18	55,5	45 – 70 (±5)
N°30	0,60	41,5	30 – 50 (±5)
N°50	0,30	28,4	18 – 30 (±5)
N°100	0,15	16,9	10 – 21 (±3)
N°200	0,075	12,0	5 – 15 (±2)

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4. Resultado granulométrico de la muestra 3



Fuente: Elaboración propia

Como se pueden observar en los gráficos, hay una pequeña diferencia de la granulometría de diseño con las granulometrías que se colocaron en las vías. Sin embargo, se mantienen dentro de las especificaciones ISSA, lo cual nos garantiza calidad de ejecución.

4.2.2.2. Resultados de % de asfalto residual de las muestras

A través del ensayo de extracción centrífuga se obtienen los siguientes porcentajes de asfalto residual que se aplicó en las calles y avenidas de la Ciudad de Tarija.

Tabla 4.8. Contenido de asfalto residual de las muestras.

Datos	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso filtro + plato (gr)	1365,3	1365,3	1365,4
Peso filtro + plato + muestra antes (gr)	2005,5	2016,3	2005,9
Peso filtro + plato + muestra después (gr)	1959	1969,3	1958
Peso de la mezcla (gr)	640,2	651	640,5
Peso de la agregado (gr)	593,7	604	592,6
Porcentaje de asfalto residual (%)	7,3	7,2	7,5

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los valores finales se asemejan al valor de diseño igual a 7,4%. En la primera muestra el valor de porcentaje residual es menor con un 0,1%, en la segunda muestra el valor de porcentaje residual es menor con un 0,2% y en la tercera muestra el valor de porcentaje residual es mayor con un 0,1%. El valor de la segunda muestra es el más se aleja del valor de diseño.

4.2.2.3. Resultados de adherencia

La mezcla muestreada en obra fue sometida a pruebas de adherencia a través de los ensayos de abrasión húmeda y rueda cargada, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.9. Resultados de adherencia vías WTAT y LWT.

Resultados	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Especificaciones de diseño
% de asfalto residual (%)	7,3	7,2	7,5	7,4
Abrasión Húmeda (WTAT:ISSA TB100) (gr/cm ²)	161	311	283	< 538
Rueda Cargada (LWT:ISSA TB109) (gr/cm ²)	408	403	387	< 538

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los resultados de WTAT, son los más variables a comparación de los resultados LWT, sin embargo, todos los valores cumplen con las especificaciones al generar valores de adherencia menores a 538 gr/cm².

4.3. Evaluación superficial del micropavimento

Una vez terminado el colocado y extendido de la mezcla MPAF, se deja el tiempo necesario de curado, es decir hasta que se evapore exude y evapore el agua de mezclado. Como se aplicó una emulsión asfáltica de curado rápido, entonces después de 24 hr está disponible para el tránsito vehicular.

Una vez concluido el proceso, se puede realizar una evaluación superficial del micropavimento asfáltico en frío. La evaluación se realiza en 32 puntos diferentes con micropavimento que fueron aplicados a las vías de la ciudad de Tarija.

4.3.1. Evaluación con el densímetro PQI 380 del micropavimento

Para la evaluación del micropavimento que se encuentra en constante uso por el movimiento vehicular, se procede a hacer uso del densímetro no nuclear PQI 380, cuyo equipo nos da valores de densidad, porcentaje de vacíos y el grado de compactación a la que se encuentra el micropavimento.

4.3.1.1. Uso y aplicación del Densímetro PQI 380

En el último tiempo un nuevo equipo denominado Densímetro No Nuclear fue introducido en el mercado internacional, el cual funciona por medio de impedancia eléctrica,

obteniendo con precisión lecturas de densidad en los pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.

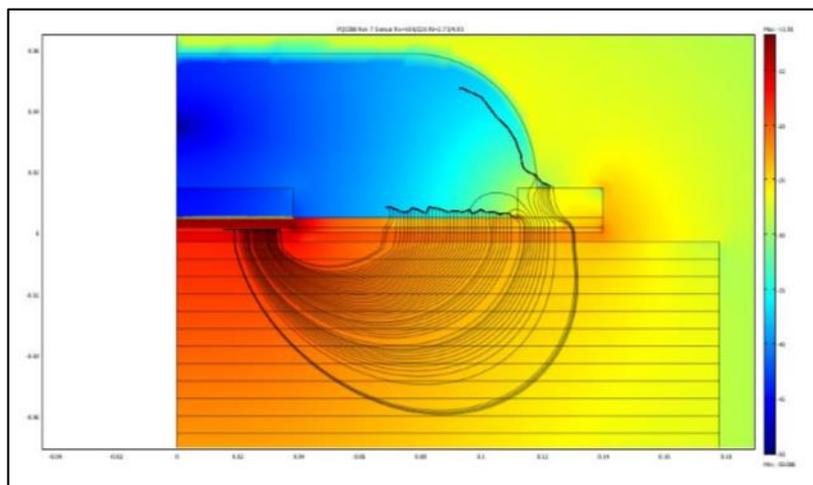
Principio de funcionamiento

El Densímetro No Nuclear se basa en el principio de impedancia eléctrica. La Impedancia Eléctrica del material a ensayar es proporcional a la constante dieléctrica e inversamente proporcional al volumen de huecos y al porcentaje de compactación, es decir, el campo eléctrico va a variar en función de la densidad. El campo eléctrico es transmitido a través del material, desde la placa sensora del equipo. Luego la impedancia es medida y utilizada en el cálculo de la densidad de ese conjunto específico.

A medida que la mezcla asfáltica en caliente es compactada (es decir, aumenta la densidad y disminuyen los vacíos de aire), cambia la proporción del volumen de aire, provocando un cambio en la señal registrada por el Equipo.

Esto implica que la densidad obtenida por el Densímetro No Nuclear no es un valor absoluto, por lo tanto, debe corregirse por un valor de referencia (Testigo de Asfalto).

Figura 4.3. Campo eléctrico que transmite la placa sensora PQI 380



Fuente: Manual densímetro PQI 380. Trans Tech.

Ventajas

- No necesita licencia especial de operación y permisos para materiales radioactivos.
- Es ligero y fácil de usar.
- Posee una autonomía de funcionamiento portátil de aproximadamente 12 horas.

- Almacena en su memoria una cantidad importante de registros, que se descargan a través de una unidad USB.
- No necesita transporte y una bodega de almacenamiento especial.

Limitaciones

- La placa de estandarización o patrón es única para cada medidor.
- No deben realizarse mediciones cerca de grandes objetos metálicos.
- No debe utilizar el equipo cerca de cables eléctricos de alta tensión.

Aplicaciones

El PQI está principalmente destinado al control de pavimentos asfálticos recién extendidos con un espesor que puede variar entre 0,75 y 6 pulgadas (20 y 150 mm). Una vez calibrado con la densidad estándar de cada material, el PQI registrará medidas de densidad fiables y consistentes.

Seguridad que proporciona

El densímetro PQI 380 es práctico y fácil de usar e intrínsecamente seguro. El PQI 380 no hace uso de sustancias radioactivas y emplea técnicas de medida seguras, de corriente continua de baja tensión, y por tanto no hay que preocuparse por las placas, licencias, ni requisitos de transporte o almacenaje.

Figura 4.4. Uso del equipo densímetro no nuclear PQI 380.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.2. Resultados del ensayo Densímetro PQI 380

Los resultados obtenidos de la práctica son:

Tabla 4.10. Resultados obtenidos con el densímetro PQI 380

Punto	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Compactación (%)	Vacios (%)
1	21,0	2.253,0	98,38	1,62
2	21,0	2.236,0	96,37	3,63
3	20,2	2.218,0	95,62	4,38
4	18,0	2.246,0	99,82	0,18
5	20,0	2.130,0	99,09	0,91
6	20,0	2.052,0	99,63	0,37
7	19,4	2.190,0	99,56	0,44
8	21,0	2.159,0	98,12	1,88
9	20,0	2.202,0	98,75	1,25
10	20,0	2.109,0	100,43	-0,43
11	20,0	2.188,0	98,12	1,88
12	21,0	2.136,0	99,34	0,66
13	21,0	2.193,0	99,67	0,33
14	21,0	2.066,0	98,37	1,63
15	19,2	2.084,0	99,25	0,75
16	20,4	2.046,0	96,47	3,53
17	21,0	2.101,0	98,62	1,38
18	19,4	2.073,0	97,31	2,69
19	20,1	2.146,0	95,36	4,64
20	20,0	2.209,0	98,47	1,53
21	21,3	2.098,0	97,20	2,80
22	21,0	2.173,0	98,00	2,00
23	21,0	2.139,0	96,04	3,96
24	20,2	2.085,0	99,12	0,88
25	20,0	2.127,0	98,45	1,55
26	20,0	2.151,0	96,33	3,67
27	20,0	2.076,0	99,25	0,75
28	19,6	2.163,0	99,71	0,29
29	19,0	2.207,0	97,84	2,16
30	18,5	2.090,0	99,89	0,11
31	19,3	2.126,0	98,22	1,78
32	19,0	2.135,0	99,30	0,70

Fuente: Elaboración propia

En los resultados se observan densidades elevadas, similares a la de una mezcla asfáltica convencional, que oscilan por los 2.200,00 kg/m³.

Por otra parte, los porcentajes del grado de compactación también cumplen con las especificaciones de acabado, que deben ser mayor al 95%. Y los porcentajes de vacíos que no deben pasar el 5% para mezclas densas.

Existe un valor del porcentaje de compactación mayor a 100% y de vacíos un valor negativo, esto se debe a que en ese punto se generó una densidad mayor a la de diseño, y por lo tanto genera un mayor grado de compactación y un menor porcentaje de vacíos al del diseño.

4.3.1.3. Tratamiento estadístico de los valores de densímetro PQI 380

A partir de los datos obtenidos con el densímetro no nuclear PQI 380, se procede a realizar el análisis estadístico para validar los datos e identificar el error que se produjo.

Tabla 4.11. Tratamiento estadístico de los valores de densímetro PQI 380.

Punto	Densidad (Kg/m ³)	Error abs.	Error %	Compactación (%)	Error abs.	Error %	Vacíos (%)	Error abs.	Error %
1	2.253,0	109,03	4,84	98,38	0,06	0,07	1,62	0,06	3,97
2	2.236,0	92,03	4,12	96,37	1,95	2,02	3,63	1,95	53,60
3	2.218,0	74,03	3,34	95,62	2,70	2,82	4,38	2,70	61,54
4	2.246,0	102,03	4,54	99,82	1,50	1,51	0,18	1,50	835,76
5	2.130,0	13,97	0,66	99,09	0,77	0,78	0,91	0,77	85,10
6	2.052,0	91,97	4,48	99,63	1,31	1,32	0,37	1,31	355,24
7	2.190,0	46,03	2,10	99,56	1,24	1,25	0,44	1,24	282,81
8	2.159,0	15,03	0,70	98,12	0,20	0,20	1,88	0,20	10,41
9	2.202,0	58,03	2,64	98,75	0,43	0,44	1,25	0,43	34,75
10	2.109,0	34,97	1,66	100,43	2,11	2,11	-0,43	2,11	-491,7
11	2.188,0	44,03	2,01	98,12	0,20	0,20	1,88	0,20	10,41
12	2.136,0	7,97	0,37	99,34	1,02	1,03	0,66	1,02	155,21
13	2.193,0	49,03	2,24	99,67	1,35	1,36	0,33	1,35	410,42
14	2.066,0	77,97	3,77	98,37	0,05	0,06	1,63	0,05	3,34
15	2.084,0	59,97	2,88	99,25	0,93	0,94	0,75	0,93	124,58
16	2.046,0	97,97	4,79	96,47	1,85	1,91	3,53	1,85	52,28
17	2.101,0	42,97	2,05	98,62	0,30	0,31	1,38	0,30	22,06

18	2.073,0	70,97	3,42	97,31	1,01	1,03	2,69	1,01	37,38
19	2.146,0	2,03	0,09	95,36	2,96	3,10	4,64	2,96	63,70
20	2.209,0	65,03	2,94	98,47	0,15	0,16	1,53	0,15	10,09
21	2.098,0	45,97	2,19	97,20	1,12	1,15	2,80	1,12	39,84
22	2.173,0	29,03	1,34	98,00	0,32	0,32	2,00	0,32	15,78
23	2.139,0	4,97	0,23	96,04	2,28	2,37	3,96	2,28	57,47
24	2.085,0	58,97	2,83	99,12	0,80	0,81	0,88	0,80	91,41
25	2.127,0	16,97	0,80	98,45	0,13	0,14	1,55	0,13	8,67
26	2.151,0	7,03	0,33	96,33	1,99	2,06	3,67	1,99	54,10
27	2.076,0	67,97	3,27	99,25	0,93	0,94	0,75	0,93	124,58
28	2.163,0	19,03	0,88	99,71	1,39	1,40	0,29	1,39	480,82
29	2.207,0	63,03	2,86	97,84	0,48	0,49	2,16	0,48	22,02
30	2.090,0	53,97	2,58	99,89	1,57	1,58	0,11	1,57	1431,25
31	2.126,0	17,97	0,85	98,22	0,10	0,10	1,78	0,10	5,37
32	2.135,0	8,97	0,42	99,30	0,98	0,99	0,70	0,98	140,62
Valor prom.=	2.143,97	Error máx. =	4,84	98,32	Error máx. =	3,10	1,68	Error máx. =	1431,25

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.11 se observa claramente los errores de los resultados obtenidos, con los valores de densidad se genera un error máximo de 4,84 %, con los valores de grado de compactación se genera un error máximo de 3,10 %, estos valores indican que el equipo me proporciona valores aceptables porque no sobrepasan el error máximo admisible de 5 %. Por otra parte, ocurre lo contrario con los porcentajes de vacíos, se observa una enorme amplitud de errores desde 3,34% mínimo y hasta 1.431,25% máximo, desviándose por completo de error máximo admisible de 5%. Por lo tanto, a partir de este valor de error, se deduce que el equipo densímetro PQI 380, no proporcionan valores válidos de porcentajes de vacíos y por lo tanto esos resultados no deben tomarse en cuenta.

4.3.2. Evaluación IFI del micropavimento

Para realizar la evaluación superficial del micropavimento, nos enfocamos en el acabado textural que nos proporciona, es decir se realizó un estudio del Índice de Fricción Internacional (IFI), que se basa en los ensayos de péndulo británico para determinar la micro textura, y de la Mancha de Arena para determinar la macro textura.

Figura 4.5. Evaluación de micro textura con el péndulo británico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6. Evaluación de macro textura con el ensayo círculo de arena.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.12. Datos obtenidos de la evaluación IFI.

Punto	Medidas con el círculo de arena (cm)					Prom.	T °C	Medidas con péndulo de fricción (BPN)					Prom.
1	31,00	32,20	32,00	32,50	33,00	32,14	23,00	58,00	66,00	70,00	74,00	75,00	68,60
2	30,50	31,00	31,50	31,00	32,00	31,20	24,00	56,00	50,00	54,50	60,00	62,00	56,50
3	29,00	30,00	30,00	28,50	29,00	29,30	23,00	50,00	55,00	59,00	59,00	59,00	56,40
4	30,50	31,00	31,00	30,80	31,50	30,96	23,00	52,50	51,00	49,50	50,00	51,00	50,80
5	39,00	38,50	39,00	39,00	39,00	38,90	23,00	65,00	66,00	68,00	69,00	69,00	67,40
6	35,50	33,30	34,00	35,00	35,00	34,56	23,00	85,00	86,00	90,00	90,00	91,00	88,40
7	38,00	37,50	38,50	38,00	39,00	38,20	23,00	89,00	91,00	92,00	95,00	95,00	92,40
8	46,00	46,00	46,50	46,50	46,50	46,30	23,00	94,00	94,00	95,50	97,50	98,00	95,80
9	41,00	42,50	42,00	42,00	41,00	41,70	24,00	79,00	81,00	84,00	86,00	88,00	83,60
10	35,50	33,50	36,00	35,50	36,00	35,30	23,00	76,00	79,00	79,50	80,00	80,00	78,90
11	38,00	36,00	37,00	37,00	35,50	36,70	23,00	69,00	72,50	75,00	75,50	75,00	73,40
12	34,00	34,00	32,00	33,50	34,00	33,50	26,00	86,00	86,00	85,00	86,00	85,00	85,60
13	27,50	26,00	26,00	26,50	28,00	26,80	26,00	59,00	61,00	65,00	66,00	66,50	63,50
14	25,00	26,50	27,00	25,50	26,00	26,00	25,00	75,00	80,50	81,00	82,00	81,50	80,00
15	22,00	21,50	23,00	22,50	24,00	22,60	25,00	79,00	81,00	85,00	85,00	85,00	83,00
16	15,50	16,00	16,00	16,00	16,50	16,00	25,00	75,00	76,00	74,00	76,00	76,00	75,40
17	20,00	20,50	21,00	21,00	21,00	20,70	25,00	69,00	74,00	77,00	80,00	82,00	76,40
18	16,00	17,00	17,00	16,00	16,50	16,50	25,00	59,00	64,00	67,00	71,00	72,50	66,70
19	21,00	20,00	20,00	20,00	20,50	20,30	25,00	76,00	81,00	84,00	84,00	84,50	81,90
20	24,00	25,50	24,00	24,50	24,00	24,40	25,00	54,00	56,00	59,00	61,00	60,00	58,00
21	26,00	26,00	26,00	25,00	26,50	25,90	25,00	52,00	58,00	61,50	65,00	63,00	59,90
22	31,00	32,00	30,50	31,00	31,00	31,10	25,00	52,50	56,00	60,00	65,00	67,00	60,10
23	30,00	30,00	31,00	31,00	30,00	30,40	25,00	54,00	55,00	62,00	65,00	66,00	60,40
24	32,50	31,00	33,00	33,00	32,00	32,30	25,00	66,00	70,50	72,50	74,00	75,00	71,60
25	22,50	22,50	22,50	21,50	22,00	22,20	26,00	52,50	55,00	57,50	59,00	60,00	56,80
26	21,00	21,00	22,00	20,00	20,50	20,90	26,00	61,00	62,50	62,50	65,00	67,00	63,60
27	26,00	27,50	27,00	27,00	27,00	26,90	25,00	52,00	55,00	57,50	60,00	61,00	57,10
28	24,00	25,00	25,00	25,00	24,50	24,70	24,00	64,00	67,00	70,00	75,00	75,00	70,20
29	21,50	20,00	21,00	20,00	20,00	20,50	25,00	63,00	67,50	71,00	74,00	75,00	70,10
30	20,00	18,50	19,00	20,00	19,00	19,30	24,00	61,00	62,50	65,00	66,50	67,00	64,40
31	25,00	23,00	24,00	23,00	24,00	23,80	22,00	60,50	61,00	65,00	66,00	66,00	63,70
32	25,00	24,00	25,50	25,50	24,50	24,90	24,00	66,00	62,50	61,00	64,00	65,00	63,70

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos se realiza el cálculo correspondiente aplicando las ecuaciones de la norma AASHTO.

Tabla 4.13. Resultados obtenidos de la evaluación IFI de cada punto.

Punto	FRs	Dp	H = Tx	Sp	FR60	F60
1	69,31	32,14	0,308	23,40	8,18	0,166
2	57,42	31,20	0,327	25,56	8,12	0,165
3	57,11	29,30	0,371	30,56	11,12	0,197
4	51,51	30,96	0,332	26,13	7,60	0,159
5	68,11	38,90	0,210	12,26	1,16	0,090
6	89,11	34,56	0,267	18,74	6,18	0,144
7	93,11	38,20	0,218	13,17	2,09	0,100
8	96,51	46,30	0,148	5,22	0,01	0,078
9	84,52	41,70	0,183	9,20	0,37	0,082
10	79,61	35,30	0,255	17,38	4,48	0,126
11	74,11	36,70	0,236	15,22	2,77	0,108
12	86,92	33,50	0,284	20,67	7,74	0,161
13	64,82	26,80	0,443	38,74	17,83	0,269
14	81,13	26,00	0,471	41,92	24,62	0,341
15	84,13	22,60	0,623	59,19	36,15	0,465
16	76,53	16,00	1,243	129,65	52,04	0,635
17	77,53	20,70	0,743	72,83	39,02	0,496
18	67,83	16,50	1,169	121,24	44,91	0,559
19	83,03	20,30	0,772	76,13	43,05	0,539
20	59,13	24,40	0,535	49,20	21,40	0,307
21	61,03	25,90	0,475	42,38	18,76	0,279
22	61,23	31,10	0,329	25,79	8,81	0,172
23	61,53	30,40	0,344	27,49	9,98	0,185
24	72,73	32,30	0,305	23,06	8,32	0,167
25	58,12	22,20	0,646	61,81	25,88	0,355
26	64,92	20,90	0,729	71,24	32,18	0,422
27	58,23	26,90	0,440	38,40	15,84	0,247
28	71,12	24,70	0,522	47,72	24,94	0,345
29	71,23	20,50	0,757	74,42	36,38	0,467
30	65,32	19,30	0,855	85,56	36,41	0,468
31	64,18	23,80	0,562	52,26	24,66	0,342
32	64,62	24,90	0,513	46,70	22,15	0,315
Promedio =				43,851		0,280

Fuente: Elaboración propia.

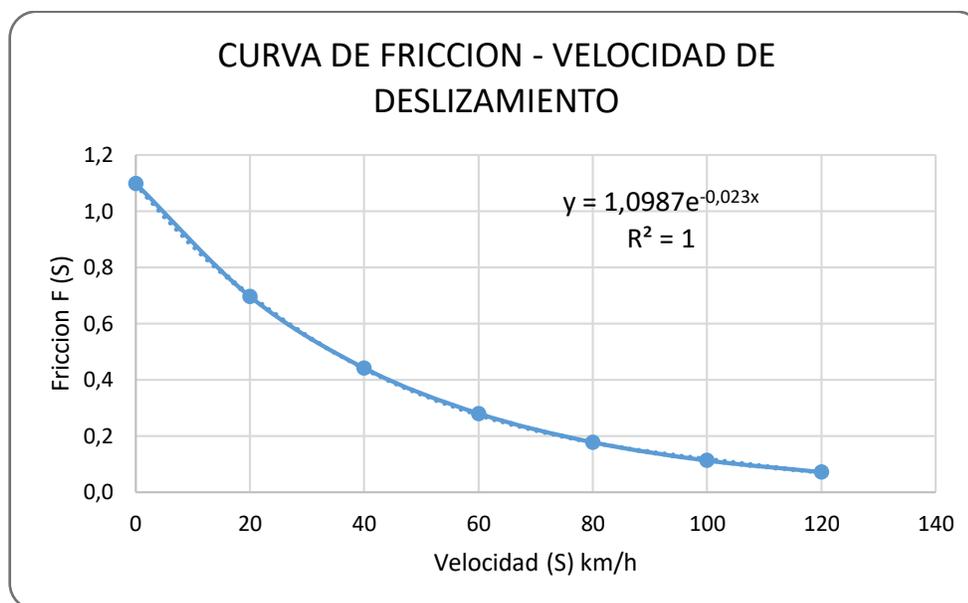
Con los valores IFI se obtienen fricciones a diferentes velocidades de tránsito, como se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4.14. Índice de fricción a diferentes velocidades

S	0	20	40	60	80	100	120
	F(0)	F(20)	F(40)	F(60)	F(80)	F(100)	F(120)
F (S)	1,099	0,696	0,441	0,280	0,177	0,112	0,071

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Curva de fricción vs. Velocidad de deslizamiento.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de la ecuación que nos proporciona el gráfico 4.5, e introduciendo el valor de fricción mínima de 0,373 según la norma AASHTO en la cual se basa la norma ABC, se obtiene la velocidad máxima segura igual a 46,97 km/hr.

Tabla 4.15. Resultados finales de la evaluación IFI.

Valor de la fricción mínima según el manual de la ABC	0,373	Adm.
Velocidad máxima segura	46,97	km/hr

Fuente: Elaboración propia.

Analizando el valor de 46,97 km/hr, se puede concretar que con el micropavimento la velocidad máxima admisible debe ser de 45 km/hr, para señalización y seguridad vial. Lo cual nos representa una velocidad baja para avenidas, generando así posibles patinajes de ruedas a altas velocidades.

4.3.2.1. Análisis estadístico del péndulo británico

A partir de los datos obtenidos con el péndulo británico se procede a realizar el análisis estadístico para validar los datos e identificar el error que se produjo.

Tabla 4.16. Tratamiento estadístico a los valores del péndulo británico.

Punto	T °C	Fricción corregida promedio	Error absoluto					DV	E %
1	23,00	69,31	10,61	2,61	1,40	5,40	6,40	5,28	7,62
2	24,00	57,42	0,50	6,50	2,00	3,50	5,50	3,60	6,27
3	23,00	57,11	6,41	1,41	2,60	2,60	2,60	3,12	5,46
4	23,00	51,51	1,70	0,20	1,31	0,81	0,20	0,84	1,63
5	23,00	68,11	2,41	1,41	0,59	1,60	1,60	1,52	2,23
6	23,00	89,11	3,41	2,41	1,60	1,60	2,60	2,32	2,60
7	23,00	93,11	3,41	1,41	0,41	2,60	2,60	2,08	2,23
8	23,00	96,51	1,81	1,81	0,31	1,69	2,19	1,56	1,62
9	24,00	84,52	4,60	2,60	0,40	2,40	4,40	2,88	3,41
10	23,00	79,61	2,91	0,09	0,59	1,10	1,10	1,16	1,45
11	23,00	74,11	4,41	0,91	1,60	2,10	1,60	2,12	2,86
12	26,00	86,92	0,40	0,40	0,60	0,40	0,60	0,48	0,55
13	26,00	64,82	4,50	2,50	1,50	2,50	3,00	2,80	4,32
14	25,00	81,13	5,01	0,50	1,00	2,00	1,50	2,00	2,46
15	25,00	84,13	4,01	2,01	2,00	2,00	2,00	2,40	2,85
16	25,00	76,53	0,41	0,59	1,41	0,59	0,59	0,72	0,94
17	25,00	77,53	7,41	2,41	0,59	3,60	5,60	3,92	5,05
18	25,00	67,83	7,71	2,71	0,30	4,30	5,80	4,16	6,13

19	25,00	83,03	5,91	0,91	2,10	2,10	2,60	2,72	3,27
20	25,00	59,13	4,01	2,01	0,99	3,00	2,00	2,40	4,06
21	25,00	61,03	7,91	1,91	1,60	5,10	3,10	3,92	6,42
22	25,00	61,23	7,61	4,11	0,10	4,90	6,90	4,72	7,71
23	25,00	61,53	6,41	5,41	1,60	4,60	5,60	4,72	7,67
24	25,00	72,73	5,61	1,11	0,89	2,40	3,40	2,68	3,68
25	26,00	58,12	4,30	1,80	0,70	2,20	3,20	2,44	4,20
26	26,00	64,92	2,60	1,10	1,10	1,40	3,40	1,92	2,96
27	25,00	58,23	5,11	2,11	0,40	2,90	3,90	2,88	4,94
28	24,00	71,12	6,20	3,20	0,20	4,80	4,80	3,84	5,40
29	25,00	71,23	7,11	2,61	0,89	3,90	4,90	3,88	5,45
30	24,00	65,32	3,40	1,90	0,60	2,10	2,60	2,12	3,25
31	22,00	64,18	3,20	2,70	1,30	2,30	2,30	2,36	3,68
32	24,00	64,62	2,30	1,20	2,70	0,30	1,30	1,56	2,41
Error máximo =									7,71

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.16. se puede analizar que el error máximo es de 7,71%, por lo tanto, el 92,29% de los datos son válidos. Sin embargo, si comparamos con el error máximo admisible de 5%, entonces podemos observar que se excede con el 2,71% en error, puntualizando expresa que ese porcentaje de datos deben ser depurados.

4.3.2.2. Análisis estadístico de la mancha de arena

A partir de los datos obtenidos con la mancha de arena se procede a realizar el análisis estadístico para validar los datos e identificar el error que se produjo.

Tabla 4.17. Tratamiento estadístico a los valores de la mancha de arena

Punto	Diámetro promedio (cm)	Error absoluto					DV	E %
1	32,14	1,14	0,06	0,14	0,36	0,86	0,51	1,59
2	31,20	0,70	0,20	0,30	0,20	0,80	0,44	1,41
3	29,30	0,30	0,70	0,70	0,80	0,30	0,56	1,91
4	30,96	0,46	0,04	0,04	0,16	0,54	0,25	0,80
5	38,90	0,10	0,40	0,10	0,10	0,10	0,16	0,41
6	34,56	0,94	1,26	0,56	0,44	0,44	0,73	2,11
7	38,20	0,20	0,70	0,30	0,20	0,80	0,44	1,15
8	46,30	0,30	0,30	0,20	0,20	0,20	0,24	0,52
9	41,70	0,70	0,80	0,30	0,30	0,70	0,56	1,34
10	35,30	0,20	1,80	0,70	0,20	0,70	0,72	2,04
11	36,70	1,30	0,70	0,30	0,30	1,20	0,76	2,07
12	33,50	0,50	0,50	1,50	0,00	0,50	0,60	1,79
13	26,80	0,70	0,80	0,80	0,30	1,20	0,76	2,84
14	26,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,00	0,60	2,31
15	22,60	0,60	1,10	0,40	0,10	1,40	0,72	3,19
16	16,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	0,20	1,25
17	20,70	0,70	0,20	0,30	0,30	0,30	0,36	1,74
18	16,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,40	2,42
19	20,30	0,70	0,30	0,30	0,30	0,20	0,36	1,77
20	24,40	0,40	1,10	0,40	0,10	0,40	0,48	1,97
21	25,90	0,10	0,10	0,10	0,90	0,60	0,36	1,39
22	31,10	0,10	0,90	0,60	0,10	0,10	0,36	1,16
23	30,40	0,40	0,40	0,60	0,60	0,40	0,48	1,58
24	32,30	0,20	1,30	0,70	0,70	0,30	0,64	1,98
25	22,20	0,30	0,30	0,30	0,70	0,20	0,36	1,62
26	20,90	0,10	0,10	1,10	0,90	0,40	0,52	2,49
27	26,90	0,90	0,60	0,10	0,10	0,10	0,36	1,34
28	24,70	0,70	0,30	0,30	0,30	0,20	0,36	1,46
29	20,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	2,93
30	19,30	0,70	0,80	0,30	0,70	0,30	0,56	2,90
31	23,80	1,20	0,80	0,20	0,80	0,20	0,64	2,69
32	24,90	0,10	0,90	0,60	0,60	0,40	0,52	2,09
Error máximo =							3.19	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.17. se puede observar que el error máximo es de 3,19%, por lo tanto, el 96,81% de los datos son válidos. Sin embargo, si comparamos con el error máximo admisible de 5%, entonces podemos observar que está dentro del rango y todos los datos son aceptables.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

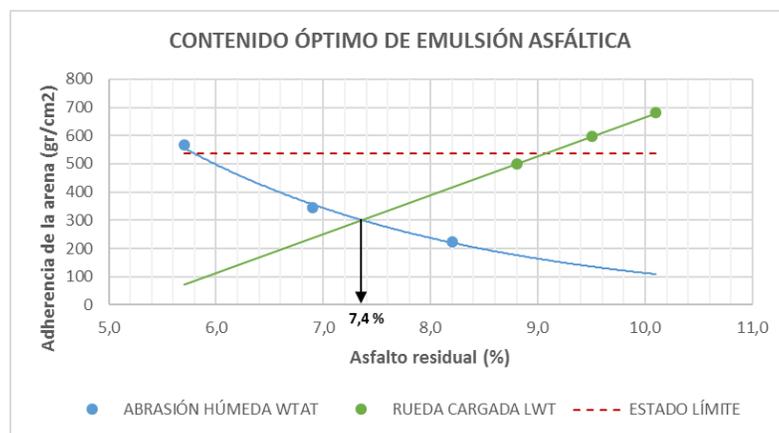
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Después de desarrollar el trabajo de investigación, se llega a las siguientes conclusiones:

- A partir de la evaluación al micropavimento aplicado en las vías urbanas de la Ciudad de Tarija, se logra conocer las nuevas técnicas de diseño y puesta en obra, con controles de calidad a través de ensayos en laboratorio y en obra.
- Una vez realizada la caracterización de los componentes de la mezcla de micropavimento en frío se logra diseñar la mezcla y determinar con los métodos de abrasión húmeda (WTAT) y rueda cargada (LWT), el contenido óptimo de asfalto residual que es igual al 7,4% como se observa en el siguiente gráfico.

Gráfico 5.1. Contenido óptimo de emulsión asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

- También es necesario mencionar, que durante el proceso del colocado de la mezcla de micropavimento en las avenidas de la ciudad de Tarija, se logra muestrear y verificar los resultados de diseño, es decir que los resultados de contenido de asfalto residual fueron 7,3 %, 7,2 % y 7,5 % con poca variación del valor de diseño igual al 7,4%, por lo tanto, cumple con las especificaciones de calidad, como se

observa en la tabla 4.9. Así también se concluye que las tres muestras cumplen con los valores de adherencia (WTAT y LWT) al obtener resultados menores a 538 (gr/cm^2).

- Por otra parte, se verificó que las granulometrías también cumplen las especificaciones de calidad, porque resultan casi idéntica a la curva granulométrica de diseño, con pequeña variación en los tamices N°100 y N°200 como se observan en los gráficos 4.2, 4.3 y 4.4.
- Respecto a la evaluación con el densímetro PQI 380, el valor promedio de densidad y grado de compactación de la carpeta micropavimentada, es igual a 2143,97 gr/cm^3 y 98,32 % respectivamente. Con respecto al ser una mezcla muy densa por el tipo de agregado filler que emplea, el valor promedio de vacíos es igual al 1,68%.
- Ante los resultados de la evaluación superficial, podemos observar los resultados de evaluación superficial, obtenemos que la velocidad máxima segura determinada por el método IFI, es igual a 46,97 km/hr, lo que se considera como un valor mínimo, indicando un buen grado de rugosidad, generando desgaste a las llantas, pero si observamos desde otro punto de vista, el micropavimento proporciona cierta rugosidad para evitar el patinaje y el tránsito vehicular a grandes velocidades.
- Así también un micropavimento en frío ofrece menor impacto ambiental, debido a que no se necesita de plantas asfálticas donde calienten el material bituminoso porque su compuesto es emulsión asfáltica modificada con polímeros. Las plantas asfálticas se utilizan para el calentamiento del asfalto, éstas tienen un gran poder de contaminación sobre todo atmosférica, además, las labores de transporte y almacenamiento hacen que se liberen y puedan producir humos, gases y vapores que contienen sustancias letalmente tóxicas.

- Después de haber estudiado y observado la situación de nuestro país y de otros países a nivel mundial que emplean pavimentos en construcción vial. Se puede llegar a la conclusión de que los pavimentos requieren trabajos de mantenimiento desde el momento mismo en que la carretera es puesta al servicio porque en el asfalto inmediatamente se inicia un proceso de deterioro gradual debido a varios factores como: la acción de los rayos solares que contribuyen a su oxidación, la aplicación de esfuerzos originados por el tráfico con pesos por encima del especificado, cambios bruscos de temperatura y variaciones del contenido de humedad en los estratos subyacentes que generan valores diferenciales de expansión y contracción de las capas de pavimento, etc. Por lo tanto, a lo anteriormente mencionado resulta importante que se apliquen medidas previsoras que podrían acelerar su deterioro.
- En conclusión, se logra verificar durante la puesta en obra, la calidad de aplicación del micropavimento, cumpliendo con las especificaciones de diseño, el espesor y el tiempo de curado para habilitar el tránsito vehicular.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones para este trabajo investigación son:

- Para el diseño de mezclas del MPAF a ser aplicado en las calles y avenidas de la ciudad de Tarija, es aconsejable emplear como agregado el polvo de roca, debido a que cumple con todas las características físico-mecánicas exigidas por las especificaciones técnicas internacionales para garantizar la rehabilitación y el desempeño de vida de servicio.
- En cumplimiento de las normas ISSA y ASTM D 6934, es recomendable que la emulsión asfáltica presente un contenido de asfalto residual $\geq 62\%$.

- Se debe considerar las variaciones de temperatura y humedad ambiental, que afectan directamente en el contenido de humedad en formulación, la rotura y cura de la mezcla.
- Es recomendable aplicar el micropavimento en frío para zonas templadas, si la temperatura ambiente durante la puesta en obra es mayor a 10°C, esto por el polímero que contiene la emulsión asfáltica. Además, para garantizar el tiempo de curado.
- Se sugiere la inclusión en los pliegos de especificaciones técnicas de construcción y mantenimiento de carreteras, como una alternativa, el uso de emulsiones asfálticas por las ventajas que estos productos ofrecen.
- Por último, se recomienda que para la ejecución de estas obras se tomen en cuenta al personal más calificado, siempre a cargo de especialistas en suelos y pavimentos.