



POSGRADOS

Maestría en

Vialidad y Transporte

RPC-SO-05-No.087-2024

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Evaluación de Compatibilidad de Agregados Provenientes de Fuentes Locales de Guayaquil para la Aplicación de Micropavimento en el Mantenimiento Preventivo de la Infraestructura Vial

Autor

Henry Paul Coyago Quinga

Director:

Francisco Roberto Ortiz Navas

QUITO – Ecuador

2025

Autor:



Henry Paul Coyago Quinga

Ingeniero Civil

Candidato a Magíster en Vialidad y Transporte por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

hcoyagoq@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Francisco Ortiz Navas

Ingeniero Civil

Doctor en Ingeniería de la Construcción

fortizn@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Henry Paul Coyago Quinga

Maestría en Vialidad y Transporte

DEDICATORIA

Con especial dedicación a mi madre, cuyo amor incondicional, fortaleza y ejemplo de perseverancia han sido mi mayor inspiración a lo largo de este camino. Su apoyo constante, sacrificios y motivación me han brindado la fuerza necesaria para superar cada desafío y alcanzar esta meta.

También dedico este trabajo con profundo cariño a mis niñas, Jaqueline y Gloria, quienes han sido parte importante en mi vida. Su apoyo, palabras de aliento y confianza en mis capacidades han sido una fuente invaluable de motivación y fortaleza durante mi formación académica y mi día a día.

A mis hermanas, Mónica y Ammy, por alentarme siempre a alcanzar las metas que me propongo. Su confianza en mis capacidades y su apoyo han sido importantes para que crea en mí mismo y en la posibilidad de lograr todo aquello que me he planteado.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi familia, por su apoyo incondicional, su confianza y por ser el pilar fundamental que ha sostenido cada paso de este proceso académico. Su respaldo emocional y motivación constante han sido esenciales para alcanzar esta meta.

Extiendo también mi sincero agradecimiento a la empresa Emuldec, por haber facilitado el uso de sus instalaciones y brindar el soporte técnico necesario para la realización de los ensayos de laboratorio que sustentan este trabajo. Su colaboración fue determinante para el desarrollo riguroso y práctico de esta investigación.

A todos quienes, de una u otra manera, contribuyeron a la culminación de esta tesis, les expreso mi gratitud más profunda.

Tabla de Contenido

Resumen	11
Abstract	13
1. Introducción	15
2. Determinación del Problema.....	18
2.1 Problema.....	18
2.2 Objetivos.....	19
3. Marco teórico referencial.....	20
3.1 Definición	20
3.2 Reseña Histórica	21
3.3 Tipos de micropavimento	22
3.3.1 Micropavimento Tipo II	23
3.3.2 Micropavimento Tipo III	23
3.4 Aplicación del Micropavimento	25
3.5 Análisis costo-beneficio del micropavimento frente a métodos convencionales de mantenimiento preventivo vial.....	27
3.6 Componentes del Micropavimento	30
3.6.1 Agregados	30
3.6.2 Relleno Mineral	32
3.6.3 Emulsión asfáltica	33
3.6.4 Emulsificante	34
3.6.5 Polímero	36
3.6.6 Agua	37
3.7 Proceso Constructivo del Micropavimento	38
3.7.1 Preparación de la superficie	39
3.7.2 Aplicación del riego de liga	39
3.7.3 Calibración del equipo esparcidor.....	41
3.7.4 Extensión de la mezcla	41
3.7.5 Curado Y Apertura Al Tránsito.....	42
4. Materiales y metodología.....	44
4.1 Tipo de investigación	44
4.2 Material.....	44

4.2.1	Agregados	44
4.2.2	Emulsión asfáltica	44
4.3	Canteras	45
4.3.1	Cantera Rookaazul	46
4.3.2	Cantera Verdú	47
4.3.3	Cantera Techbuildres	48
4.3.4	Cantera San José – Vía a la costa	49
4.3.5	Cantera San José – Tenguel	50
4.4	Normativas vigentes para materiales de micropavimento	51
4.4.1	Normativas para agregados	51
4.4.2	Normativas para asfalto emulsificado	52
4.4.3	Normativas para diseño de la mezcla	53
4.5	Caracterización de los agregados	53
4.5.1	Muestreo de los agregados de las canteras, Norma ASTM D - 75/ASHTO T - 2	53
4.5.1.1	Descripción	53
4.5.1.2	Equipos	54
4.5.1.3	Ejecución	54
4.5.2	Granulometría de los agregados	55
4.5.2.1	Descripción	55
4.5.2.2	Equipos	56
4.5.2.3	Ejecución	56
4.5.2.4	Resultados	58
4.5.3	Índice de plasticidad de las canteras de acuerdo a la Norma ASTM D 4318	65
4.5.3.1	Descripción	65
4.5.3.2	Equipos	65
4.5.3.3	Ejecución	66
4.5.3.4	Resultados	67
4.5.4	Solidez del agregado por medio de sulfato de sodio de las canteras, Norma ASTM C - 88 /ASHTO T - 104	67
4.5.4.1	Descripción	67
4.5.4.2	Equipos	67
4.5.4.3	Ejecución	68
4.5.4.4	Resultados	69

4.5.5	Abrasión mediante Máquina de los Ángeles de las canteras, Norma ASTM C- 131 /ASHTO T- 96	71
4.5.5.1	Descripción.....	71
4.5.5.2	Equipos.....	71
4.5.5.3	Ejecución	71
4.5.5.4	Resultados.....	73
4.5.6	Azul de metileno de las canteras, Norma ISSA TB – 145.....	73
4.5.6.1	Descripción.....	73
4.5.6.2	Equipos.....	74
4.5.6.3	Ejecución	74
4.5.6.4	Resultados.....	75
4.5.7	Equivalente de arena de las canteras, Norma ASTM D 2419 /ASHTO T 176	77
4.5.7.1	Descripción.....	77
4.5.7.2	Equipos.....	78
4.5.7.3	Ejecución	78
4.5.7.4	Resultados.....	81
4.6	Caracterización de la emulsión asfáltica.....	83
4.6.1	Ensayo para determinar el porcentaje de asfalto residual. Norma ASTM D- 244 / AASHTO T- 59.....	84
4.6.1.1	Descripción.....	84
4.6.1.2	Equipo	84
4.6.1.3	Ejecución	84
4.6.1.4	Resultados.....	85
4.6.2	Ensayo de estabilidad de asentamiento. Norma AASHTO T- 59/ ASTM D- 244	86
4.6.2.1	Descripción.....	86
4.6.2.2	Equipo	87
4.6.2.3	Ejecución	87
4.6.2.4	Resultados.....	88
4.6.3	Ensayo de reblandecimiento del bitumen. Norma ASTM D- 36 / AASHTO T-53	89
4.6.3.1	Descripción.....	89
4.6.3.2	Equipo	89
4.6.3.3	Ejecución	90
4.6.3.4	Resultados.....	92

4.6.4	Ensayo de penetración de material bituminoso. Norma ASTM D- 5 / AASHTO T-46	93
4.6.4.1	Descripción.....	93
4.6.4.2	Equipo	93
4.6.4.3	Ejecución	94
4.6.4.4	Resultados.....	97
4.7	Análisis y comportamiento de la mezcla	98
4.7.1	Porcentaje teórico de emulsión en la mezcla de micropavimento.....	98
4.7.2	Humedad óptima en la mezcla. Norma ISSA TB- 106.....	101
4.7.2.1	Descripción.....	101
4.7.2.2	Equipos.....	101
4.7.2.3	Ejecución	101
4.7.2.4	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P 103	
4.7.2.5	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK) 105	
4.7.3	Tiempo de mezcla. Norma ISSA TB- 113	106
4.7.3.1	Descripción.....	106
4.7.3.2	Equipos.....	107
4.7.3.3	Ejecución	107
4.7.3.4	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P 108	
4.7.3.5	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK) 109	
4.7.4	Ensayo de cohesión. Norma ISSA TB- 139.....	111
4.7.4.1	Descripción.....	111
4.7.4.2	Equipos.....	111
4.7.4.3	Ejecución	112
4.7.4.4	Resultado Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P 114	
4.7.4.5	Resultado Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK) 115	
4.7.5	Ensayo de abrasión en húmedo. Norma ISSA TB- 100.....	117
4.7.5.1	Descripción.....	117
4.7.5.2	Equipos.....	117
4.7.5.3	Ejecución	117
4.7.5.4	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P 120	

4.7.5.5	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)	122
4.7.6	Ensayo de rueda de carga. Norma ISSA TB- 109	122
4.7.6.1	Descripción.....	122
4.7.6.2	Equipos.....	123
4.7.6.3	Ejecución	123
4.7.6.4	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P	125
4.7.6.5	Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)	126
4.8	Determinación del porcentaje óptimo de emulsión	127
4.8.1	Porcentaje óptimo Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P	127
4.8.2	Porcentaje óptimo Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)	128
5.	Resultados y discusión.....	130
5.1	Caracterización de los agregados	130
5.2	Caracterización de la emulsión asfáltica.....	132
5.3	Resumen de formulación para Micropavimento con Agregado de la Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P	133
5.4	Resumen de formulación para Micropavimento con Agregado de la Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)	135
6.	Conclusiones.....	136
	Referencias	141

Evaluación de compatibilidad de agregados provenientes de fuentes locales de Guayaquil para la aplicación de micropavimento en el mantenimiento preventivo de la infraestructura vial

Autor(es):

HENRY PAUL COYAGO QUINGA

Resumen

El mantenimiento de las vías es esencial para asegurar la movilidad, seguridad y sostenibilidad de la red vial. Las carreteras, como pilares del desarrollo económico y social, requieren atención constante para evitar el deterioro acelerado, que puede derivar en altos costos de rehabilitación, accidentes y una disminución en el bienestar y comodidad de los usuarios. Una gestión eficiente del mantenimiento vial contribuye significativamente a prolongar la vida útil de la infraestructura, al mismo tiempo que permite un uso más racional de los recursos al minimizar intervenciones correctivas de mayor magnitud.

En este contexto, el micropavimento se presenta como una alternativa moderna y eficiente. Este tratamiento, basado en una mezcla de emulsión asfáltica modificada, agregados finos y aditivos, permite renovar la superficie de rodadura de manera económica y rápida. Sus ventajas incluyen la restauración de la textura superficial, mejora de la impermeabilidad y sellado de fisuras incipientes, lo que previene daños mayores y reduce significativamente los costos y tiempos de intervención en comparación con métodos tradicionales.

En Ecuador, esta técnica ha sido aplicada en diversos proyectos de mantenimiento vial, destacándose su implementación en la vía Perimetral de Guayaquil, donde se logró renovar el pavimento y prevenir el deterioro prematuro. Además, en proyectos viales de la Sierra y Costa ecuatoriana, el micropavimento ha demostrado su capacidad para prolongar la vida útil de las carreteras y mejorar la seguridad de los usuarios.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de la mezcla de micropavimento utilizando el agregado proveniente de la cantera que cumpla con los requisitos técnicos, a fin de verificar su compatibilidad con una emulsión asfáltica de tipo comercial utilizada en tratamientos superficiales. Para ello, se recolectarán muestras de agregados de cinco canteras de Guayaquil y se

realizarán ensayos de laboratorio que permitan determinar sus propiedades físicas y mecánicas. El propósito de este estudio es identificar los agregados que cumplan con los requisitos establecidos por la International Slurry Surfacing Association (ISSA), y someterlos a una serie de ensayos de desempeño con el fin de determinar la formulación óptima de la mezcla, conocida como fórmula maestra, para el diseño de micropavimento.

La metodología, de carácter experimental, se centrará en evaluar las variables principales: tipo de agregado y tipo de emulsión asfáltica. Los resultados contribuirán al desarrollo de un diseño eficiente de micropavimento adaptado a las necesidades locales, optimizando el uso de recursos y promoviendo soluciones sostenibles para el mantenimiento preventivo de la infraestructura vial en la región.

Palabras clave:

Micropavimento, Emulsión Asfáltica, ISSA, Tratamiento superficial.

Abstract

Proper road maintenance is essential to ensure mobility, safety, and the sustainability of the road network. As fundamental components of economic and social development, roads require continuous attention to prevent accelerated deterioration, which can result in high rehabilitation costs, increased accident risks, and reduced comfort and well-being for users. Efficient management of road maintenance significantly contributes to extending the service life of infrastructure while promoting more rational use of resources by minimizing the need for major corrective interventions.

Within this context, micro-surfacing presents itself as a modern and cost-effective alternative. This surface treatment, composed of a mixture of polymer-modified asphalt emulsion, fine aggregates, and additives, enables rapid and economical renewal of the pavement surface. Its benefits include restoring surface texture, improving impermeability, and sealing early-stage cracks—thus preventing more severe damage and significantly reducing both costs and intervention time when compared to traditional methods.

In Ecuador, this technique has been applied in various road maintenance projects, most notably along the Perimetral Highway in Guayaquil, where it has successfully renewed the pavement and mitigated premature deterioration. Furthermore, micro-surfacing has demonstrated favorable performance in other projects across both the Sierra and Coastal regions of the country, effectively extending pavement life and improving road safety.

This study seeks to evaluate the performance of a micro-surfacing mixture using aggregate sourced from the quarry that meets all technical requirements, in order to assess its compatibility with a commercially available asphalt emulsion used in surface treatments. Aggregate samples will be collected from five quarries in Guayaquil and subjected to laboratory testing to determine their

physical and mechanical properties. The goal is to identify the materials that comply with the standards set by the International Slurry Surfacing Association (ISSA) and to carry out performance tests to determine the optimal formulation, also known as the job mix formula, for micro-surfacing design.

The research follows an experimental approach and focuses on evaluating two main variables: the type of aggregate and the type of asphalt emulsion. The results are expected to support the development of an efficient micro-surfacing mix adapted to local conditions, optimizing material usage and promoting sustainable practices for the preventive maintenance of road infrastructure in the region.

Palabras clave:

Microsurfacing, Asphalt Emulsion, ISSA, Surface treatment.

1. Introducción

El micropavimento es una técnica de mantenimiento vial que utiliza una mezcla de asfalto emulsionado modificado con polímeros, agregados minerales, agua y aditivos específicos, aplicados y distribuidos uniformemente sobre una superficie pavimentada previamente preparada. Este método permite crear una capa delgada que refuerza y prolonga la vida útil de las carreteras, a la vez que mejora sus condiciones de rodadura y seguridad (ISSA A143, 2010).

Este tipo de sellos se aplicaron por primera vez a principios de la década de los años 30 en Alemania. Sin embargo, su mayor desarrollo se produjo principalmente en la década de los años 60, gracias a la aparición de equipos de flujo continuo y a los avances en la tecnología de emulsiones asfálticas (Jiménez Mónica et al., 2016).

En Ecuador, el uso del micropavimento ha sido objeto de análisis para determinar su adaptabilidad a las condiciones locales. Espinoza Cristian (2023) realizó un estudio en la provincia del Azuay que evaluó la efectividad de diferentes tipos de micropavimento, utilizando un diseño tipo III con emulsiones CQS 1h P y CQS 1h PU, y agregados provenientes de la cantera Rocka Azul. Los resultados indicaron contenidos óptimos de emulsión entre 11% y 16.5%, y de asfalto entre 5.5% y 10.23%. Este análisis confirmó que el micropavimento es una solución eficiente y rentable para el mantenimiento vial, especialmente en contextos donde la relación costo-calidad es prioritaria.

Por otro lado, la investigación de Luis Vicente Toscano (2014), “Diseño de Micropavimento aplicado como tratamiento superficial para el control de la Variación Térmica en el pavimento flexible de la vía Pifo - Cusubamba, como parte del mantenimiento preventivo”, destacó que los diseños de micropavimento deben adaptarse a las características específicas de cada país. Toscano subrayó que factores como el clima, la temperatura, la humedad y las propiedades de los materiales locales tienen un impacto crítico en el desempeño del micropavimento.

Además, enfatizó la necesidad de utilizar materiales propios de la región y de realizar ensayos bajo condiciones climatológicas representativas para garantizar la funcionalidad y durabilidad de la técnica.

Por otra parte Boada Gustavo & Urgiles Luis (2011) desarrollaron un diseño de micropavimento tipo III conforme a las normas internacionales (ISSA A143, 2010) utilizando materiales locales en su investigación “Diseño y evaluación de micropavimentos con emulsión asfáltica modificada con polímeros, para agregados de canteras de Guayllabamba, Pintag, Pifo, San Antonio y Nayón en el distrito metropolitano de Quito”. Este estudio demostró la importancia de ajustar las proporciones de emulsión, agua y agregados para optimizar la mezcla y mejorar la durabilidad del pavimento. Además, resaltó que la selección adecuada de materiales en función de las condiciones locales es esencial para maximizar la eficacia técnica y económica del micropavimento.

(Barrionuevo Luis, 2012), en su estudio “Diseño del micropavimento utilizando emulsión asfáltica modificada con polímero, con agregado procedente de la cantera Calagua de la ciudad de san miguel, provincia de Bolívar”, los resultados mostraron que el agregado corresponde al Tipo III; sin embargo se menciona que para utilizar en micropavimento se debe compensar la deficiencia de finos; el diseño de la mezcla de micropavimento se empleó una emulsión de curado lento CSS-1H modificada con polímero cuyo porcentaje óptimo de emulsión después de las pruebas de desempeño dio como resultado 10.94%

(Bueno Jorge & Pilay Irving, 2020), en su investigación “Estudio a nivel de pre factibilidad, exploratoria y diagnóstica, para la rehabilitación y mantenimiento de pavimentos flexibles, analizando el deterioro debido a los impactos ambientales colocando micro pavimento”, realizan un estudio de los diferentes tipos de falla presentes en varias vías de la ciudad de Guayaquil y propone como solución la aplicación del micropavimento y realizan el diseño de micropavimento con el agregado de la cantera La Roca ubicada en el km 18 de la vía a Daule, provincia del Guayas; este diseño se realiza con emulsión CQS-1H-P para una granulometría tipo III y da como resultado un porcentaje de emulsión óptimo del 13.7%.

Estos estudios reflejan la relevancia de realizar investigaciones que integren los recursos locales en el diseño del micropavimento, optimizando su rendimiento técnico y reduciendo los costos de implementación. En el caso de Guayaquil, la abundancia de fuentes de agregados ofrece una oportunidad significativa para desarrollar diseños adaptados a las necesidades específicas de la región, aprovechando las características particulares de los materiales disponibles.

El trabajo tiene como finalidad evaluar los agregados provenientes de cinco canteras de Guayaquil para la producción de micropavimento. Para ello, se llevará a cabo la recolección de muestras de agregados, las cuales serán sometidas a varios ensayos de laboratorio destinados a caracterizar sus propiedades físicas y mecánicas. Este estudio busca determinar los agregados que ofrecen el mejor desempeño en términos de durabilidad y eficiencia, con el propósito de desarrollar un diseño optimizado de micropavimento que no solo satisfaga las demandas específicas de mantenimiento vial en la región, sino que también promueva un uso sostenible y eficiente de los recursos locales.

2. Determinación del Problema

2.1 Problema

La caracterización de los agregados es crucial para el desempeño del micropavimento, ya que sus propiedades físicas y mecánicas influyen directamente en el desempeño del material. Una selección adecuada de los agregados mejora la resistencia a la deformación, la adherencia y la durabilidad del micropavimento, lo que garantiza una infraestructura vial más eficiente y segura.

En Guayaquil, la falta de información sobre las propiedades de los agregados locales limita la implementación efectiva de soluciones de micropavimento. Esta falta de datos puede resultar en un incremento de los costos de mantenimiento y una pérdida prematura de la infraestructura vial. La caracterización adecuada de los agregados es esencial para garantizar que cumplan con las especificaciones necesarias, asegurando que el micropavimento aplicado tenga un rendimiento óptimo en diversas condiciones climáticas y de tráfico. Estudios han demostrado que la variabilidad en la granulometría de los agregados puede afectar significativamente el desempeño del micropavimento, resaltando la importancia de una caracterización detallada (Díaz Palomino et al., 2017).

Además, utilizar materiales locales no solo puede disminuir los costos asociados al transporte de agregados, sino que también fomenta el desarrollo económico de la región al aprovechar los recursos disponibles. La utilización de materiales locales en la construcción de carreteras contribuye a la sostenibilidad y eficiencia de los proyectos viales, al reducir la huella de carbono y apoyar la economía local (Abertis, 2024). Por lo tanto, la caracterización de los agregados locales es una estrategia clave para optimizar el desempeño del micropavimento y promover prácticas de construcción más sostenibles y económicas.

2.2 Objetivos

Se llevará a cabo la evaluación de los agregados de cinco canteras representativas de la ciudad de Guayaquil mediante ensayos normalizados de laboratorio de acuerdo a las normas internacionales ASTM, ASSHTO e ISSA con el objetivo de identificar los agregados pétreos idóneos que cumplan con las especificaciones técnicas requeridas para su utilización en mezclas de micropavimento.

Posteriormente, los agregados que cumplan con los estándares presentes en la Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación (ISSA A143, 2010) , serán sometidos a mezclas con dos tipos de emulsiones asfálticas catiónicas modificadas con polímeros: La primera denominada CQS-1H-P y la segunda CQS-1H-P(QK), estas difieren por el tipo de emulsificante empleado en su formulación. Estas mezclas de micropavimento serán evaluadas mediante ensayos de desempeño tales como cohesión (ISSA TB -139, 2012), abrasión en húmedo (ISSA TB-100, 2012), y rueda cargada (ISSA TB-109, 2018) con el objetivo de determinar la formulación de micropavimento óptima que proporcione el mejor desempeño estructural.

Los resultados obtenidos tienen como finalidad ser un aporte técnico sobre el comportamiento de micropavimento formulado con agregados pétreos de fuentes locales y su compatibilidad con dos tipos de emulsiones comerciales para el desarrollo del mantenimiento preventivo de las diferentes vías de la ciudad de Guayaquil.

3. Marco teórico referencial

3.1 Definición

Según la International Slurry Surfacing Association (2010), el micropavimento es un tratamiento superficial compuesto por una mezcla de emulsión asfáltica modificada con polímeros, agregados minerales, agua y aditivos. Estos componentes son dosificados y mezclados para su aplicación uniforme sobre una superficie previamente preparada. Su versatilidad permite su uso en diferentes espesores, facilitando su implementación en la corrección de baches, capas niveladoras y superficies fresadas.

La tecnología de micropavimento es una técnica económica, eficiente y eficaz para prevenir la degradación del pavimento, lo que resulta beneficioso para prevenir su desprendimiento, retrasar su envejecimiento, aumentar la fricción y mantener su estabilidad. (Lv et al., 2021)

Una vez aplicado, el micropavimento forma una capa homogénea con alta resistencia al desgaste y una adecuada textura superficial para mejorar la seguridad vial. Tras su curado inicial y consolidación por el tráfico, esta mezcla desarrolla mayor compactación, lo que prolonga su vida útil.

Bajo condiciones climáticas óptimas, puede soportar tráfico ligero en aproximadamente una hora tras su aplicación en espesores de hasta 12.7 mm. Sin embargo, en áreas de alto frenado o intersecciones, es recomendable extender el tiempo de apertura al tráfico pesado, garantizando así su estabilidad y desempeño.

Además, dado que esta tecnología requiere menos recursos, se produce en frío y se coloca con un espesor bajo, tiene un bajo costo, un período de construcción corto y una rápida apertura al tráfico. (Moura et al., 2023)

3.2 Reseña Histórica

El micropavimento se originó como una innovación en la ingeniería vial con el propósito de ofrecer una solución eficiente para la conservación y rehabilitación de pavimentos flexibles.

El micropavimento fue desarrollado inicialmente en Europa, donde es conocido generalmente como micro concreto asfáltico. A mediados de los años 70's, Screg Route una compañía Francesa diseñó un Seal-Gum que era un micro concreto asfáltico el cual fue posteriormente mejorado por la firma Raschig de Alemania. Raschig comercializó su producto en los Estado Unidos bajo el nombre de "Ralumac" a principios de los años 80's. A finales de la década de los 80's, la firma Española Elsamex desarrollo y comercializo su micro concreto asfáltico en los Estados Unidos bajo el nombre de Macroseal (U.S Department of Transpotation, 1994).

El uso del micropavimento se expandió a Estados Unidos en la década de 1980, convirtiéndose en una técnica popular para la rehabilitación de pavimentos envejecidos. La International Slurry Surfacing Association desempeñó un papel crucial en la estandarización de los procedimientos de aplicación y en la definición de normativas para su correcta ejecución. Durante este periodo, se establecieron ensayos técnicos como el ISSA TB- 100 (2012), que permitió evaluar la calidad de las mezclas y su resistencia al desgaste.

El micropavimento fue desarrollada en Europa en 1970 y fue hasta principios de 1980 cuando fue usada en los Estados Unidos y casi al mismo tiempo se influencio a Latinoamérica para el uso de esta tecnología como parte de estrategias de mantenimiento vial en países como Colombia, Chile y Brasil. (Benites Raymundo, 2006)

Su implementación permitió extender la durabilidad funcional de los pavimentos sin necesidad de reconstrucciones costosas, favoreciendo a una mejor gestión de recursos y mejorando la transitabilidad en carreteras urbanas y rurales.

Ecuador comenzó a adoptar esta tecnología en los últimos años, con proyectos piloto en ciudades como Guayaquil y Quito, impulsados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas y administraciones municipales. Estas iniciativas han permitido evaluar la efectividad del micropavimento en la mitigación del deterioro superficial de las vías. Investigaciones y monitoreos de desempeño han confirmado que esta tecnología ofrece mejoras significativas en la seguridad vial, al incrementar la resistencia al deslizamiento y alargar la vida útil del pavimento, especialmente en tramos con tráfico moderado a alto.

En la actualidad, el micropavimento es reconocido como una de las tecnologías más innovadoras y eficientes para la conservación de pavimentos flexibles. Su rápida habilitación al tránsito permite reducir significativamente las interrupciones viales, mientras que su menor costo en comparación con métodos tradicionales lo convierte en una alternativa económicamente viable. Además, su aplicación contribuye a la sostenibilidad ambiental, al disminuir el consumo de recursos y la emisión de contaminantes durante su producción e instalación, consolidándose, así como una opción estratégica para la modernización y mantenimiento de la infraestructura vial.

3.3 Tipos de micropavimento

Según la International Slurry Surfacing Association (2010), el micropavimento se clasifica en dos tipos en función de la granulometría del agregado utilizado en la mezcla. Cada tipo tiene aplicaciones específicas según las condiciones del pavimento y los requerimientos del tránsito vehicular.

A continuación, se describen los tipos de micropavimento de acuerdo con la Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010):

3.3.1 Micropavimento Tipo II

El micropavimento tipo II emplea agregados con una granulometría intermedia, con un tamaño máximo de partícula de aproximadamente 9.5 mm (3/8"). Es el más utilizado en actividades de mantenimiento vial. La Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010) recomienda este tipo de micropavimento de acuerdo a **Tabla 1** que está se utilice en calles urbanas, residenciales y pistas en aeropuertos.

En el Ecuador este tipo de micropavimento se ha utilizado en diversas intervenciones, destacando el mantenimiento de la pista de rodaje del aeropuerto mariscal La Mar ubicado en la ciudad de Cuenca, esta capa de micropavimento proporcionó alargar la vida útil del pavimento existente y mantener una macrotextura uniforme como se puede apreciar en la Ilustración 1.



Ilustración 1. Micropavimento tipo II, Aeropuerto La Mar Cuenca 2025.

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Micropavimento Tipo III

El micropavimento Tipo III también utiliza un agregado con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8"), pero con una granulometría más gruesa, lo que le confiere una mayor resistencia mecánica. La Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010) recomienda este tipo de micropavimento de acuerdo a **Tabla 1** que está se utilice en rutas principales e interestatales donde se

tiene alto tráfico. A diferencia del micropavimento tipo II, este tratamiento superficial presenta una macrotextura más abierta, lo que garantiza una buena adherencia ante las cargas de tráfico pesado. Un ejemplo de este tipo de micropavimento se presenta en la **Ilustración 2**, donde se puede apreciar una capa de micropavimento que fue colocada en el año 2024 en la vía perimetral en la ciudad de Guayaquil.



Ilustración 2. Micropavimento tipo III, Vía Perimetral Guayaquil 2024.

Fuente: Elaboración Propia

El tipo de micropavimento seleccionado depende de las necesidades específicas del proyecto vial. La correcta elección del tamaño de los agregados y su granulometría influyen en la resistencia estructural, la textura superficial y el comportamiento de la mezcla en condiciones de tráfico y clima diversas. La correcta aplicación de los distintos tipos de micropavimento, conforme a los lineamientos establecidos por la norma ISSA A143 (2010), asegura un mantenimiento preventivo eficiente y favorece la extensión del ciclo de servicio de las infraestructuras viales.

Tabla 1. Tipo de agregado para distinto uso de micropavimento.

Tipo de agregado	Ubicación	Ritmo de aplicación sugerido
Tipo II	Calles urbanas y residenciales, Pistas en aeropuertos	10 - 20 lb/yd ² (5.4 - 10.8 kg/m ²)
	Capa niveladora	Según sea necesario
Tipo III	Rutas principales e interestatales	15 - 30 lb/yd ² (8.1 -16.3 kg/m ²)

Baches	Según sea necesario
Capa niveladora	Según sea necesario

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010)

3.4 Aplicación del Micropavimento

La aplicación del micropavimento es adecuado cuando se requiere preservar la estructura de pavimento existente, pues actúa como una superficie de desgaste que protege a la capa de rodadura existente de esta manera se alarga la vida útil del pavimento, es una técnica que si se aplica oportunamente reduce el costo de intervenciones a futuro.

Su aplicación ha demostrado ser altamente eficaz para atender diversas patologías del pavimento como se puede apreciar en la **Ilustración 3**, tales como:

- Sellos de fisuras superficiales
- Preservar pavimentos con cierto grado de oxidación.
- Corregir desprendimientos de agregado del pavimento
- Mejorar la textura de la superficie.
- Impermeabilización de superficie
- Mejorar la nivelación superficial del pavimento existente

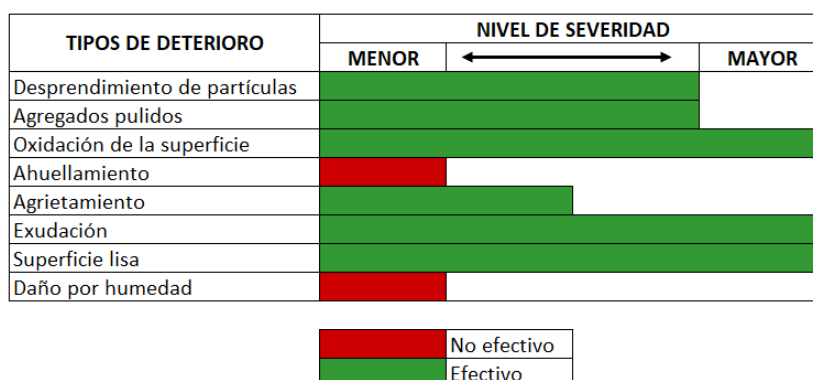


Ilustración 3. Recomendación para la aplicación de los sellos dependiendo del tipo de deterioro.

Fuente: (Jimenez et al, 2016)

Su aplicación depende de la severidad de la superficie a ser intervenida, por esta razón no se debe colocar micropavimento para los siguientes casos:

- Pavimento con severo agrietamiento por fatiga
- Superficie con grietas
- Ahuellamiento severo
- Desprendimiento del pavimento
- Superficie con daño en la estructura del pavimento
- Pavimento con problemas de drenaje



Ilustración 4. Ejemplo de daños severos del pavimento donde no se puede aplicar micropavimento. a) Desprendimiento del pavimento; b) Pavimento con problema de drenaje; c) Superficie con grietas.

Fuente: Elaboración Propia

En este tipo de situaciones como se observa en la **Ilustración 4**, la aplicación de micropavimento es viable, siempre que se realice intervenciones previas de mantenimiento, esto implica técnicas como: bacheo asfáltico, sello de fisuras y mejoramiento de drenaje; actividades indispensables para un buen funcionamiento y durabilidad del micropavimento.

3.5 Análisis costo-beneficio del micropavimento frente a métodos convencionales de mantenimiento preventivo vial.

Las técnicas de mantenimiento preventivo vial desempeñan un rol importante en la preservación y optimización de la infraestructura de carreteras, garantizando condiciones adecuadas de seguridad y transitabilidad.

Un claro ejemplo de la importancia y beneficio del micropavimento en tareas de mantenimiento preventivo es el que se presenta en el informe del comité de instalaciones públicas de la ciudad de Newton (Committee Report, 2018), donde se menciona el caso de una vía compartida entre las ciudades de Fairfield y Bridgeport ubicada en el estado de Connecticut, al noreste de los Estados Unidos, ambas ciudades ejecutaron la rehabilitación de la vía en el año 2004 mediante trabajos de fresado y colocación de 6.5 cm de mezcla asfáltica caliente. Al cabo de seis años solo la ciudad de Fairfield realizó el mantenimiento preventivo mediante sello de fisuras y la colocación de micropavimento del área correspondiente a su administración; mientras que la otra ciudad no realizó ninguna tarea de mantenimiento a su área de competencia.

En el año 2017 fue evidente los beneficios obtenidos, en la **Ilustración 5** se observa al lado derecho el tramo de vía de la ciudad de Fairfield donde se aplicó el micropavimento que a comparación del tramo de vía de la ciudad Bridgeport presenta condiciones óptimas de funcionabilidad.

Este caso nos indica que la aplicación oportuna del micropavimento nos da como resultado una prolongación de la vida útil de la capa de rodadura, lo que es sinónimo de una reducción en sus costos de mantenimiento.



Ilustración 5. Vía compartida entre las ciudades de Fairfield y Bridgeport.

Fuente: (Committee Report, 2018)

En la **Tabla 2** se resume los costos y características de las principales alternativas de mantenimiento vial en Ecuador, con base en datos obtenidos por la Cámara de la Industria de la Construcción del Ecuador (CAMICON). A partir de esta información, se realiza un análisis comparativo para determinar la mejor opción y rentable en términos de inversión, durabilidad y beneficio a largo plazo.

Tabla 2. Costos 2025 por m^2 de diferentes métodos de mantenimiento vial en Ecuador.

Método de Mantenimiento	Costo (\$/m ²)	Durabilidad (años)	Costo Total (\$) para 1,000,000 m ²	Costo Anual (\$/año)
Recapeo Asfáltico de 1"	\$4,50	4	\$4.500.000	\$1.125.000
Recapeo Asfáltico de 2"	\$8,00	7	\$8.000.000	\$1.142.857
Micropavimento	\$3,50	5	\$3.500.000	\$700.000

Fuente: Cámara de Industria de la Construcción del Ecuador (CAMICON)

Basándonos en la información presentada, se puede realizar un análisis comparativo de los diferentes métodos de mantenimiento vial utilizados en Ecuador. Los tres enfoques evaluados incluyen: el recapeo asfáltico de 1 pulgada, el

recapeo asfáltico de 2 pulgadas y el micropavimento, cada uno con costos y durabilidad diferente.

El recapeo asfáltico de 1 pulgada tiene un costo de \$4,50 por metro cuadrado y una durabilidad estimada de 4 años, lo que significa que para cubrir 1.000.000 de metros cuadrados, el costo total asciende a \$4.500.000, con un costo anual de \$1.125.000. Aunque este método mejora las condiciones de rodadura, su durabilidad es limitada, lo que implica una necesidad frecuente de intervención y mayores costos acumulativos a largo plazo.

Por otro lado, el recapeo asfáltico de 2 pulgadas ofrece una mayor resistencia estructural y una vida útil extendida de 7 años, con un costo de \$8,00 por metro cuadrado. La inversión total para una superficie de 1.000.000 de metros cuadrados es de \$8.000.000, con un costo anual de \$1.142.857. A pesar de su mayor durabilidad, este método representa la alternativa más costosa, lo que puede ser un factor limitante en proyectos con restricciones presupuestarias.

En comparación, el micropavimento se presenta como la opción más viable con un costo de \$3,50 por metro cuadrado y una durabilidad de 5 años. Para cubrir 1.000.000 metros cuadrados, el costo total es de \$3.500.000, y el costo anual asciende a \$700.000, el más bajo entre las tres alternativas. Además de su menor inversión inicial, el micropavimento ofrece otras ventajas, como una aplicación más rápida y menos afectaciones al tráfico vehicular, lo que lo hace ideal para vías de alto tránsito.

El micropavimento es la mejor alternativa en términos de costo-beneficio. Su menor costo inicial, adecuada durabilidad y bajos costos de mantenimiento anual lo convierten en una opción viable y eficiente para la conservación vial en Ecuador. Su implementación masiva podría traducirse en importantes ahorros económicos y una mejora en la infraestructura vial, asegurando carreteras en óptimas condiciones con menor inversión y menor impacto ambiental.

3.6 Componentes del Micropavimento

Es fundamental conocer las características mecánicas y físicas de todos los materiales que integran el micropavimento, ya que estos deben cumplir con una serie de especificaciones técnicas establecidas por normativas vigentes, tales como las de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), American Society for Testing and Materials (ASTM), International Slurry Surfacing Association (ISSA), así como las normativas nacionales del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI).

A continuación, se describen los componentes del micropavimento y las especificaciones técnicas que cada uno debe cumplir para garantizar su adecuada aplicación y desempeño en obra.

3.6.1 Agregados

Los agregados deben ser materiales pétreos de preferencia 100% triturados, limpios, duros y durables, exentos de partículas contaminantes tales como arcillas, materia orgánica, sales, materiales deleznable u otros elementos que puedan comprometer la estabilidad, cohesión y desempeño funcional del micropavimento.

Estos agregados deben cumplir una serie de requerimientos especificados, uno de ellos es la granulometría, la elección de esta para el uso en micropavimento depende de algunos aspectos como son: el tráfico, estructura existente, tipo de terminado superficial.

La granulometría es muy importante a la hora de realizar la caracterización del agregado, pues esta depende mucho de cómo se obtenga el material.

Según la Norma de Rendimiento Recomendada para Micropavimentación ISSA A143 (2010) emitida por la International Slurry Surfacing Association se establece la gradación especificada para mezclas de micropavimento, la cual se detalla en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Gradación del agregado para Micropavimento.

Tamiz Tamaño	Tipo II Porcentaje que Pasa	Tipo III Porcentaje que Pasa	Reservas Tolerancias
3/8 (9,5 mm)	100	100	
# 4 (4.75 mm)	90 - 100	70 - 90	± 5%
# 8 (2.36 mm)	65 - 90	45 - 70	± 5%
# 16 (1.18mm)	45 - 70	28 - 50	± 5%
# 30 (0.6 mm)	30 - 50	19 - 34	± 5%
# 50 (0.3 mm)	18 - 30	12 - 25	± 4%
# 100 (0.15 mm)	10 - 21	7 - 18	± 3%
# 200 (0.075mm)	5 - 15	5 - 15	± 2%

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010)

Además, nos indica una serie de ensayos que deben cumplir que se muestran a continuación en la **Tabla 4**:

Tabla 4. Ensayos de calidad del agregado.

Ensayo	Método de ensayo		Especificación
	AASHTO	ASTM	
Equivalente de arena, Suelos y agregados Finos	T 176	D 2419	65 mínimo
Solidez de agregados por medio de sulfatos de sodio o sulfato de magnesio	T 104	C 88	15% máximo con NA ₂ SO ₄ 25% máximo con MgSO ₄
Resistencia a la degradación de agregado grueso y pequeño tamaño por abrasión e impacto en la maquina Los Ángeles	T 96	C 131	30% máximo

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010)

3.6.2 Relleno Mineral

Según lo establecido en la Norma de Rendimiento Recomendada para Micropavimentación ISSA A143 (2010), es posible incorporar materiales minerales finos como complemento en el diseño de la mezcla, con el objetivo de mejorar su cohesión, estabilidad y comportamiento durante el proceso de aplicación y fraguado.

Los finos minerales cumplen dos propósitos principales: a) minimizar la segregación de los agregados y b) incrementar o reducir el sistema con el cual la mezcla alcanza su rompimiento y su fraguado. Para la mayoría de los agregados, los finos minerales acortan el tiempo de rompimiento. El cemento Pórtland y la cal hidratada han sido usados como finos minerales para micropavimentos. Los finos minerales, típicamente incrementan la estructura del residuo asfáltico. Para la mayoría de agregados, los finos minerales son requeridos para que la mezcla obtenga un fraguado apropiado. (Coronel Orlando, 2017)

El contenido de este relleno mineral suele representar una proporción respecto al total de la mezcla, en el rango de 0 % a 3 % del peso del agregado de acuerdo a la Norma de Rendimiento Recomendada para Micropavimentación ISSA A143 (2010) (véase *Tabla 5*), y pueden integrarse como parte del análisis granulométrico general. Su incorporación depende directamente de los requerimientos del diseño, ya que no siempre son necesarios, pero pueden aportar beneficios específicos en términos de trabajabilidad y comportamiento de la capa aplicada.

Tabla 5. Límites de los componentes del micropavimento.

MATERIALES COMPONENTES	LÍMITES SUGERIDOS
Asfalto residual	5.5 - 10.5% por peso en seco del agregado
Relleno Mineral	0.0 - 3.0% por peso en seco del agregado
Contenido de polímero	Mínimo de 3.0% de sólidos basados en el contenido del peso del bitumen
Aditivos	Según sea necesario

Agua

Según sea necesario

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143, (2010)

3.6.3 Emulsión asfáltica

Es una combinación de tres ingredientes básicos: asfalto, agua y una pequeña cantidad de agente emulsificante. Para mezclar estos componentes, se introducen en un molino coloidal, que corta el asfalto en pequeñas gotas. (Carlos & Miranda, 2022)

Las emulsiones asfálticas se dividen de acuerdo a su carga según el tipo de emulsificante utilizado para su producción, estos pueden ser:

- **Emulsiones aniónicas:** Son de carga positiva y son compatibles con los agregados silíceos que tienen una carga negativa.
- **Emulsiones catiónicas:** Son de carga negativa y son compatibles con los agregados calizos que tienen carga positiva.

También se dividen de acuerdo al tipo de rompimiento, según la norma (ASTM D977-20, 2020) , se clasifican en:

- **Rapid-Setting (RS):** Son emulsiones de rompimiento rápido, estas son utilizadas para riegos de adherencia y tratamientos como riegos de emulsión con agregados gruesos.
- **Medium-Setting (MS):** Son emulsiones de rompimiento medio, utilizadas para riego de liga e imprimación.
- **Slow-Setting (SS):** Son emulsiones de rompimiento lento, utilizadas para riego de liga, imprimación, sellos de lechada asfáltica y estabilización de materiales granulares.
- **Quick-Setting (QS):** Son emulsiones diseñadas para romperse después de su aplicación, utilizadas generalmente en tratamientos superficiales como el micropavimento.

Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros son las más comunes para el uso de mezclas de micropavimento, generalmente la cantidad de ligante asfáltico que permanece en la mezcla una vez que se ha evaporado completamente el agua de la emulsión denominado asfalto residual varía entre 5.5 a 9% del peso seco del agregado.

El proceso para producción de emulsión asfáltica es llevado a cabo en un molino coloidal, consiste principalmente en introducir el asfalto caliente al molino, y al mismo tiempo se alimenta agua emulsionante a una temperatura apropiada (véase **Ilustración 6**). El asfalto y el agua emulsionante, al pasar por el molino coloidal, se someten a intensas tensiones de cizallamiento, lo cual hace que el asfalto se divida en pequeñas gotas dentro del agua, dando lugar a la emulsión. (Mercado Ronald et al., 2008)

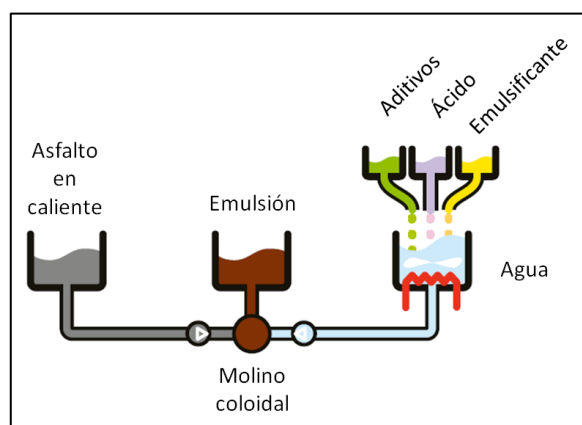


Ilustración 6. Esquema de fabricación de emulsión asfáltica.

Fuente: (Carlos & Miranda, 2022)

3.6.4 Emulsificante

Los emulsificantes son agentes químicos incorporados durante la fabricación de la emulsión asfáltica, cuya función principal es estabilizar las partículas de asfalto en suspensión y controlar el tiempo de rompimiento. En términos prácticos, un mayor contenido de emulsificante tiende a retardar el rompimiento de la emulsión dentro de la mezcla. Esta variable debe ajustarse en función de las condiciones específicas y los requisitos técnicos establecidos en el diseño de la mezcla de micropavimento.

En los inicios de la producción de emulsiones asfálticas, se utilizaban materiales como sangre de buey, arcillas y jabones como emulsionantes. A medida que aumentó la demanda de emulsiones, se encontraron emulsionantes más eficientes. Actualmente, existen numerosos emulsionantes químicos disponibles comercialmente. (Asphalt Institute, 2004)

El emulsificante genera una barrera electrostática alrededor de la gota de asfalto que provoca repulsión entre las gotas de asfalto como se aprecia en **Ilustración 7**. Gracias a este mecanismo las emulsiones pueden permanecer estables sin que se separe el agua del asfalto. El porcentaje de emulsificante en la emulsión se encuentra entre 0,1 % y 2,5 % dependiendo del tipo de emulsión. Los agentes emulsificantes se suministran en forma insoluble al fabricante de emulsión, y deben neutralizarse con ácido para que sean solubles y se pueda preparar la solución de jabonosa. (Munera Juan, 2022)

Los emulsificantes se dividen de acuerdo a su comportamiento al combinarse con el agua, estos pueden ser catiónicos los cuales al combinarse con el agua producen una carga positiva; también están los aniónicos que por lo contrario producen una carga negativa. Actúan con la carga en las partículas de betún formando una delgada capa de carga a su alrededor con la finalidad de impedir su adherencia como se puede observar en la **Ilustración 8**.

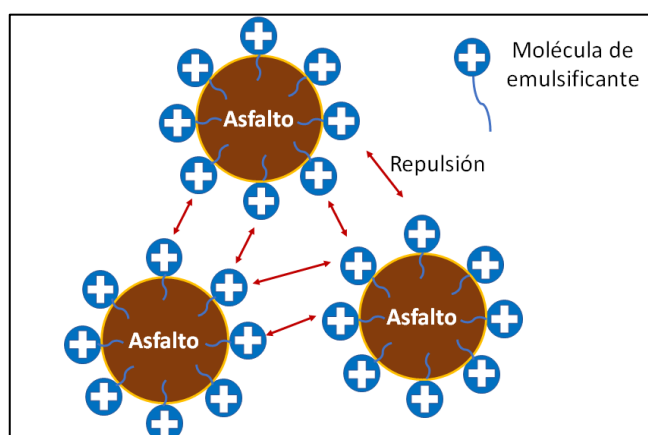


Ilustración 7. Molécula de emulsificante catiónica.

Fuente: (Munera Juan, 2022)

Los emulsificantes aniónicos más utilizados son sulfonatos de lignina, que son compuestos derivados de la madera y derivados del petróleo como los naftenatos, sulfonatos, cresilatos y sales sódicas de ácidos grasos.

La mayoría de los emulsionantes catiónicos son aminas grasas (p. ej., diaminas, imidazolininas y amidoaminas). Las aminas se convierten en jabón al reaccionar con ácido, generalmente clorhídrico. (Asphalt Institute, 2004).

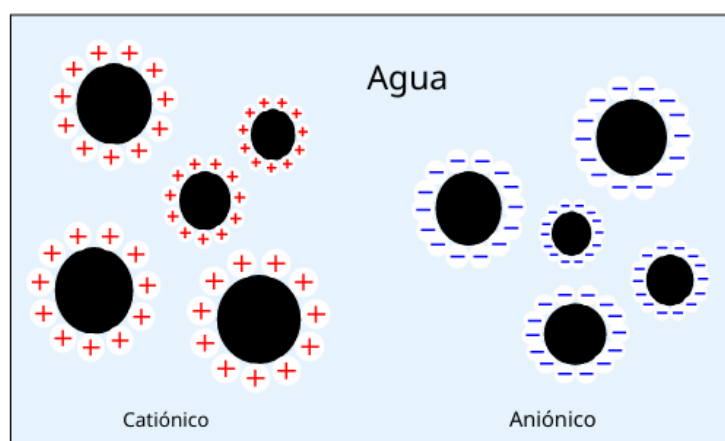


Ilustración 8. Comportamiento del emulsificante según su tipo de carga.

Fuente: (Yaacob Haryati et al., 2013)

3.6.5 Polímero

De acuerdo con lo establecido en la Norma de Rendimiento Recomendada para Micropavimentación ISSA A143 (2010), el asfalto emulsionado utilizado en la mezcla debe ser modificado con polímeros, con el fin de mejorar sus propiedades, como la flexibilidad, la adhesión y la resistencia al desgaste.

La incorporación del polímero debe realizarse previo al proceso de emulsificación, lo que implica su adición al asfalto base antes de la formación de la emulsión. Este procedimiento garantiza una integración adecuada del polímero en la estructura final del ligante, asegurando un desempeño homogéneo en la mezcla resultante.

La adición de polímeros típicamente incrementa la rigidez del asfalto y mejora su susceptibilidad a cambios de temperatura. El incremento de las propiedades

incrementa la resistencia a ahuellamientos en climas cálidos y permite el uso de bases de cemento asfáltico relativamente más blando, que a la vez, provee un mejor comportamiento en bajas temperaturas. Los ligantes modificados con polímeros, también muestran mejoras en las propiedades de cohesión y adhesión. (Solorzano Lucy et al., 2022)

Los polímeros se dividen en elastómeros y plastómeros. Los elastómeros incluyen cauchos naturales y sintéticos, estireno-butadieno-estireno, modificadores de caucho granulado recuperado de neumáticos de desecho, y los plastómeros incluyen polietileno de baja densidad, monómero de etileno-propileno dieno y acetato de etilvinilo. (Yaacob Haryati et al., 2013)

En la **Ilustración 9** se puede observar los polímeros más utilizados para modificar asfaltos, de izquierda a derecha se tiene el caucho de Estireno-butadieno (SBR), latex Estireno-butadieno-estireno (SBS) y el Etil-vinil-Acetato (EVA).

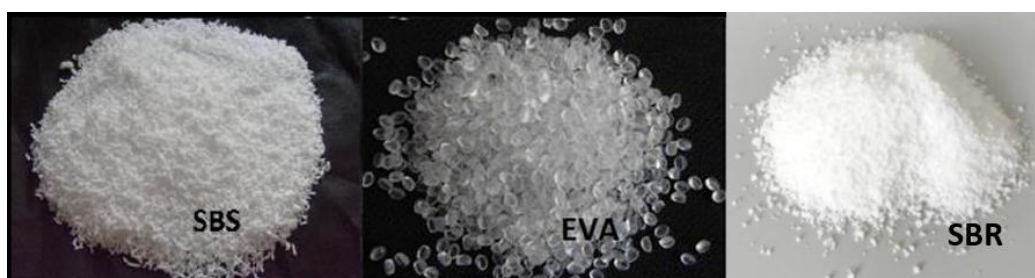


Ilustración 9. Polímeros para modificar asfaltos.

Fuente: (Casanova Wendy, 2017)

La norma ISSA A143 (2010) recomienda que el contenido mínimo de polímero sólido sea del 3 % en relación al peso del asfalto (véase **Tabla 5**), ya que esta proporción permite alcanzar un buen comportamiento del micropavimento durante su aplicación y a lo largo de su vida útil.

3.6.6 Agua

El agua a emplearse en la mezcla de micropavimento debe ser potable, libre de materiales que contaminen o modifiquen su composición; si no se tiene claro el

origen para garantizar el buen comportamiento de la mezcla, se debe enviar al laboratorio para realizar los ensayos presentes en la **Tabla 6** para que se determine que es idónea para su uso.

Tabla 6. *Ensayos para verificar la calidad del agua.*

Propiedad	Ensayo sugerido	Norma técnica
pH	Potenciómetro	ASTM D1293
Turbidez	turbidímetro	ASTM D1889
Sales disueltas	Materias disueltas (sulfatos, cloruros)	ASTM D516, D512

Fuente: Elaboración Propia

Dependiendo de la condición del agua y del porcentaje de absorción en los agregados, buenas mezclas para micropavimento pueden ubicarse en un rango limitado como contenido total de humedad, típicamente del 4 – 12 % respecto al peso seco del agregado (U.S Department of Transportation, 1994).

El agua es un componente importante en la aplicación del micropavimento, las mezclas con poco contenido de agua no tienen la trabajabilidad necesaria para esparcir sobre la superficie; mientras que colocar un porcentaje mayor al 12% suelen resultar mezclas muy fluidas, segregando el material y provocando que el ligante asfáltico quede suspendido; lo que podría provocar retrasando la rotura de la emulsión, debilitando la mezcla y comprometiendo la calidad del tratamiento superficial.

3.7 Proceso Constructivo del Micropavimento

La aplicación del micropavimento requiere una secuencia de actividades rigurosamente planificadas y ejecutadas para garantizar su desempeño estructural y funcional.

A continuación, se describe el procedimiento técnico para la correcta colocación de micropavimento sobre una carpeta asfáltica existente:

3.7.1 Preparación de la superficie

Antes de la aplicación del micropavimento, la superficie sobre la cual se va colocar debe cumplir con las siguientes condiciones:

- **Inspección de la Superficie:** Verificación de fisuras, baches, exudaciones de asfalto y pérdida de agregados.
- **Corrección de irregularidades:** Se deben reparar baches y fisuras significativas con una mezcla de material asfáltico y emulsión, asegurando una superficie uniforme.
- **Limpieza:** Se debe eliminar todo material suelto, polvo, residuos y contaminantes mediante barrido mecánico y/o soplado con aire comprimido (véase **Ilustración 10**). Uso de agua a presión si es necesario para eliminar suciedad adherida.
- **Control de humedad:** La superficie debe estar seca o con un contenido de humedad mínimo para permitir una buena adhesión del riego de liga.

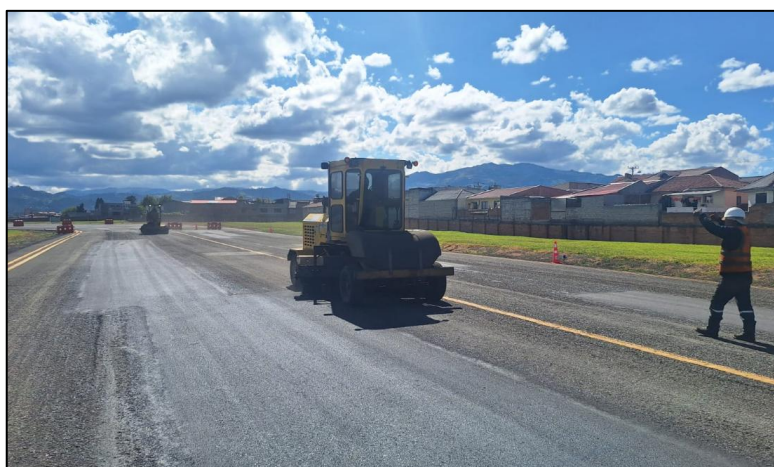


Ilustración 10. Limpieza de la superficie Aeropuerto La Mar Cuenca, 2025.

Fuente: Elaboración Propia

3.7.2 Aplicación del riego de liga

El riego de liga es un paso esencial para garantizar la adherencia entre capas y el sello de micro fisuras existentes, generalmente es necesario cuando se va colocar la capa de micropavimento sobre superficies con demasiado desgaste superficial.

Para una perfecta aplicación, se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- **Tipo de emulsión:** Se recomienda el uso de emulsión asfáltica de rompimiento rápido (CRS-1h o CSS-1h).
- **Tasa de aplicación:** De acuerdo a las Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (Ministerio De Obras Públicas, 2002) en la sección 405-2. Riego Bituminoso de Adherencia nos indica que la cantidad de aplicación será bastante reducida y dependerá del estado de la superficie a tratar. Dicha cantidad será indicada por el Fiscalizador y estará entre límites de 0.15 a 0.45 litros por metro cuadrado.
- **Curado:** Se debe esperar el tiempo necesario para que la emulsión adquiera una pegajosidad óptima antes de aplicar el micropavimento. Por lo general cuando la emulsión tiene a romper tiene como indicador el cambio de color después de ser aplicada, está presenta un aspecto más claro que al inicio como se observa en la **Ilustración 11**.



Ilustración 11. Rompimiento de la emulsión asfáltica

Fuente: (Guerrero Sergio, 2019)

3.7.3 Calibración del equipo esparcidor

Se debe calibrar el equipo esparcidor para garantizar el espesor uniforme y la dosificación del diseño previamente obtenido en el laboratorio. Esta calibración consiste en tomar el peso del agregado y emulsión asfáltica para una revolución de la banda transportadora como se muestra en la **Ilustración 12**.

Para equipos que tienen compuertas ajustables se debe realizar este procedimiento con tres medidas de apertura de compuerta para obtener valores precisos. Se realiza la relación de pesos del agregado y emulsión y se ajusta al porcentaje presente en el diseño del micropavimento, de esta manera se determina la apertura de la compuerta necesaria para determinado porcentaje de emulsión en la mezcla. De la misma forma se realiza la toma de pesos del agua y filler para ajustarlos a los porcentajes óptimos del diseño.



Ilustración 12. Calibración de Equipo para micropavimento.

Fuente: Elaboración Propia

3.7.4 Extensión de la mezcla

Es importante realizar un tramo de prueba de la capa de micropavimento de al menos 300 metros de longitud con la finalidad de verificar y evaluar el desempeño de la mezcla con los parámetros del diseño.

Una vez verificado la correcta funcionabilidad de la mezcla se inicia con la extensión total del área mediante una pavimentadora autopropulsada con caja niveladora, se inicia el tendido en franjas divididas para el área total a ejecutar, como se muestra en la **Ilustración 13**.

El ritmo de aplicación de la capa de micropavimento deberá estar de conforme a lo indicado en la **Tabla 1** de acuerdo a las recomendaciones de la ISSA A143 (2010).

En ningún caso se debe colocar micropavimento cuando se tenga malas condiciones climáticas o probabilidad de lluvia.



Ilustración 13. Colocación de Micropavimento Aeropuerto La Mar Cuenca, 2025.

Fuente: Elaboración Propia

3.7.5 Curado Y Apertura Al Tránsito

El tiempo de curado del tratamiento asfáltico varía en función de las condiciones climáticas, especialmente la temperatura ambiente y la humedad relativa. Estos factores inciden en la velocidad de evaporación del agua o solventes contenidos en la mezcla de micropavimento, así como en el desarrollo de la resistencia superficial inicial del tratamiento aplicado. En la **Ilustración 14** se puede observar como la mezcla de micropavimento colocada va curando y a medida que se evapora el agua esta va cambiando de tonalidad café a una tonalidad propia del asfalto.

En lo que respecta a la apertura al tránsito, los tiempos se establecieron considerando tanto la experiencia previa en obras similares como las recomendaciones de la literatura técnica especializada. Según el manual del Asphalt Institute (2004), los tratamientos superficiales como microaglomerados o riegos asfálticos requieren un mínimo de 4 horas de curado antes de permitir el paso de vehículos livianos. Para el tránsito pesado, se recomienda un tiempo de espera entre 12 y 24 horas, a fin de asegurar que el material alcance una resistencia suficiente que evite deformaciones prematuras, pérdida de áridos o desprendimientos.



Ilustración 14. Tramo Mahua-Jaipur de la Carretera Nacional NH-21 - India.

Fuente: (Markolines, 2017)

4. Materiales y metodología

4.1 Tipo de investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo y experimental. Se evalúa la calidad y el desempeño de los agregados provenientes de cinco fuentes locales de Guayaquil, mediante ensayos de laboratorio orientados a determinar su aptitud para su aplicación en mantenimiento preventivo mediante micropavimento. Solo los materiales que cumplan con los requisitos técnicos establecidos en la norma ISSA A143 (2010) serán considerados para el diseño de mezcla, a fin de establecer la formulación óptima del micropavimento.

4.2 Material

4.2.1 Agregados

Los agregados pétreos evaluados en este estudio provienen de distintas zonas de Guayaquil. Para la investigación se seleccionaron cinco canteras consideradas representativas por su volumen de producción y facilidad de acceso, lo que las convierte en fuentes estratégicamente relevantes para el suministro de materiales destinados a obras de mantenimiento vial en la ciudad.

4.2.2 Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica que se utilizó es producida en la empresa EMULDEC, empresa reconocida a nivel nacional como una de las líderes en elaboración de productos derivados del asfalto; esta emulsión es un ligante catiónico de curado controlado y modificada con polímeros SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), diseñada específicamente para aplicaciones en tratamientos superficiales como el micropavimento.

Se realizó el análisis y diseño de la mezcla de micropavimento con dos tipos de emulsión de curado controlado. La primera denominada CQS-1H-P y la segunda

CQS-1H-P(QK). La nomenclatura "CQS" hace referencia a sus características principales: Catiónica (C), de fraguado rápido y de alta estabilidad de almacenamiento (*Quick-Set*) y. La letra H (Hard o Heavy) indica una mayor dureza o resistencia del residuo asfáltico, mientras que la P señala la presencia de polímeros que mejoran sus propiedades mecánicas y adhesivas.

Para la emulsión asfáltica CQS-1H-P se utilizó emulsificante de origen brasilero de la empresa Aminocap; mientras que para la emulsión CQS-1H-P(QK) emulsificante de origen mexicano de la empresa Quimikao.

4.3 Canteras

En Guayaquil, la explotación de canteras de materiales pétreos constituye una actividad clave para el abastecimiento de agregados utilizados en la ejecución de obras civiles, viales y de urbanismo. Estas canteras se localizan principalmente en sectores periféricos como la vía a la Costa, vía a Daule, vía Perimetral y zonas rurales adyacentes.

Según la Guía Sectorial Minas Y Canteras de Material Pétreo (2022) publicada por ASOBANCA, en la provincia del Guayas existen 119 minas y canteras registradas, abarcando una superficie de aproximadamente 3.979 hectáreas. Estos datos reflejan la importancia de la actividad extractiva en la región para el suministro de materiales de construcción.

Entre los materiales extraídos destacan las gravas basálticas y andesíticas, reconocidas por su alta resistencia mecánica y durabilidad, especialmente en aplicaciones viales de alto tráfico. También se produce arena natural y triturada, utilizada en concretos, morteros y mezclas asfálticas, así como materiales para capas de base y subbase.

La calidad de estos materiales depende tanto del origen geológico del yacimiento como de los procesos de selección, trituración y control implementados por cada cantera.

Las canteras ubicadas en los cerros de Chongón o en la vía a la Costa, presentan materiales de buena calidad técnica, con bajos índices de abrasión según ensayo Los Ángeles. Sin embargo, también existen casos en los que se han detectado agregados con contenidos elevados de arcillas, fracciones deleznableles o variabilidad granulométrica que pueden comprometer la calidad del producto final si no se aplican correctivos. Esto demuestra que, aunque hay fuentes confiables, se requiere una evaluación técnica constante de los materiales extraídos para garantizar su idoneidad.

Se ha seleccionado agregados de cinco fuentes locales más representativas de Guayaquil, tomando en cuenta variables como su disponibilidad comercial y su uso en proyectos de infraestructura vial.

4.3.1 Cantera Rookaazul

La cantera Rookaazul, dedicada a la explotación de materiales pétreos mediante minería no metálica a cielo abierto, se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Guayaquil, en el sector Santa Rosa, provincia del Guayas, en las coordenadas geográficas 2°01'28.6" de latitud sur y 79°53'46.8" de longitud oeste (Véase **Ilustración 15**).

Esta cantera forma parte del sistema de suministro de agregados para la construcción, contribuyendo significativamente al abastecimiento de materiales destinados a obras de infraestructura vial y urbana en el área metropolitana.

El agregado producido proviene de un banco de roca sólida, el cual es procesado en sitio mediante un sistema de trituración por cono, una técnica comúnmente utilizada para reducir el tamaño del material y obtener una granulometría controlada. Esta cantera forma parte del sistema de abastecimiento de agregados de construcción para la zona metropolitana, con acceso a través de vías secundarias conectadas a la vía Perimetral.

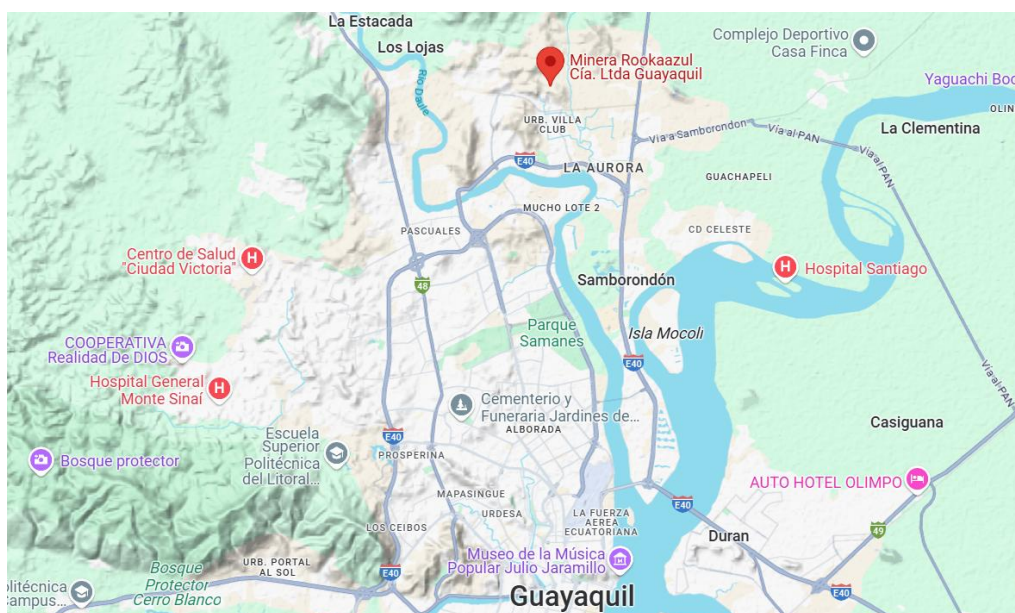


Ilustración 15. Ubicación de la cantera Rookaazul.

Fuente: Google Maps

4.3.2 Cantera Verdú

La cantera Verdú, se encuentra ubicada al norte del área urbana de la ciudad de Guayaquil, específicamente en las coordenadas $2^{\circ} 2' 14.72''$ de latitud sur y $79^{\circ} 56' 56.63''$ de longitud oeste (Véase **Ilustración 16**). La localización estratégica de la cantera permite un fácil acceso a ejes viales importantes como la vía Perimetral y vía a la Costa, lo que facilita el eficiente transporte de los agregados hacia las distintas obras de infraestructura vial.

La producción de agregados en esta cantera se origina a partir de un banco de roca, el cual es objeto de excavación y procesamiento en sitio. El material extraído se somete a un proceso de trituración mediante equipo de cono, permitiendo su reducción hasta alcanzar tamaños adecuados para aplicaciones en pavimentación, rellenos estructurales y obras de ingeniería civil. La naturaleza geológica del banco proporciona materiales de buena resistencia mecánica, adecuados para proyectos que requieren agregados durables y con baja degradabilidad.

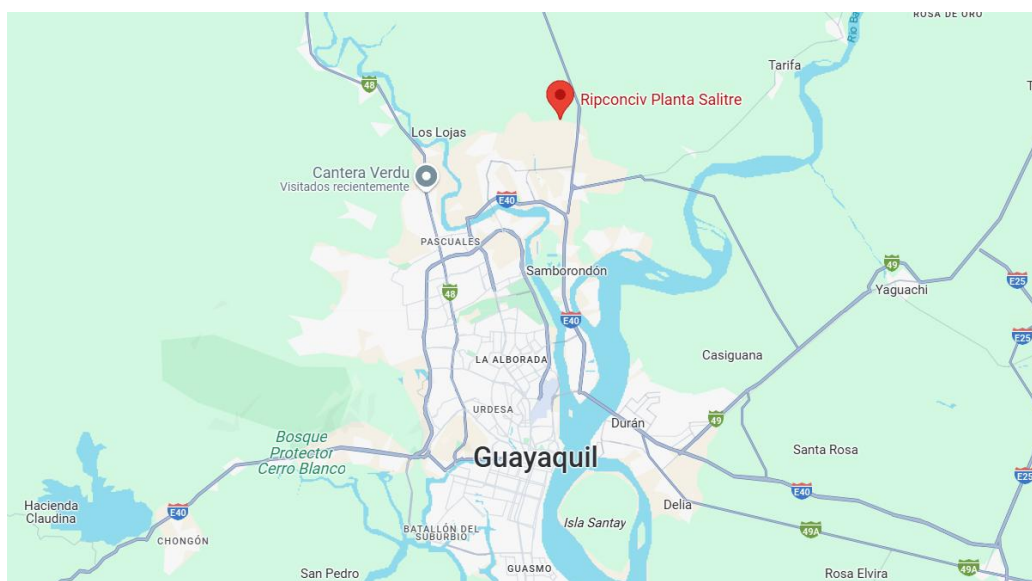


Ilustración 17. Ubicación de la cantera Techbuildres.

Fuente: Google Maps

4.3.4 Cantera San José – Vía a la costa

La cantera San José, se ubica en la vía a la Costa del cantón Guayaquil, provincia del Guayas, en las coordenadas geográficas $2^{\circ} 10' 12.32''$ de latitud sur y $79^{\circ} 58' 43.21''$ de longitud oeste (Véase **Ilustración 18**). Esta cantera se encuentra ubicada cerca de importantes zonas urbanas, lo que facilita la logística y distribución de materiales hacia la ciudad y sus alrededores.

La explotación de la cantera se realiza a cielo abierto, y se enfoca en la extracción de material pétreo de banco. El procesamiento del material se lleva a cabo mediante un sistema de trituración por cono. El material producido es utilizado principalmente en obras de infraestructura vial.

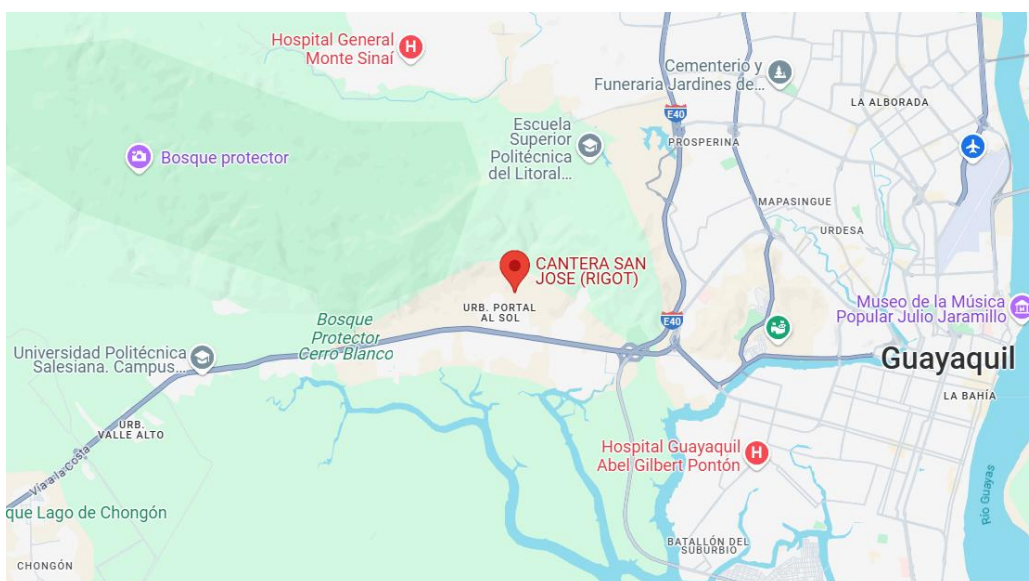


Ilustración 18. Ubicación de la cantera San José – Vía a la costa.

Fuente: Google Maps

4.3.5 Cantera San José – Tenguel

La cantera San José está localizada en las coordenadas 2° 13' 33.4" de latitud Sur y 79° 54' 54.6" de longitud Oeste, en la parroquia rural Tenguel, cantón Guayaquil, provincia del Guayas (Véase **Ilustración 19**). Está situada específicamente a lo largo del eje vial Balao – Tenguel, una vía estratégica que conecta con las principales arterias viales de la región.

En esta cantera se procesa material proveniente de depósitos aluviales. Para la trituración, se emplea un equipo VSI (Vertical Shaft Impact), el cual fragmenta la roca por impacto centrífugo dentro de una cámara de alta velocidad. Este método permite obtener un agregado con excelente cubicidad, granulometría controlada, ideal para su uso en mezclas asfálticas, hormigones y capas granulares de pavimentos.

El proceso mediante VSI garantiza una reducción eficiente del tamaño de la partícula, minimiza la presencia de agregados alargados o planos.

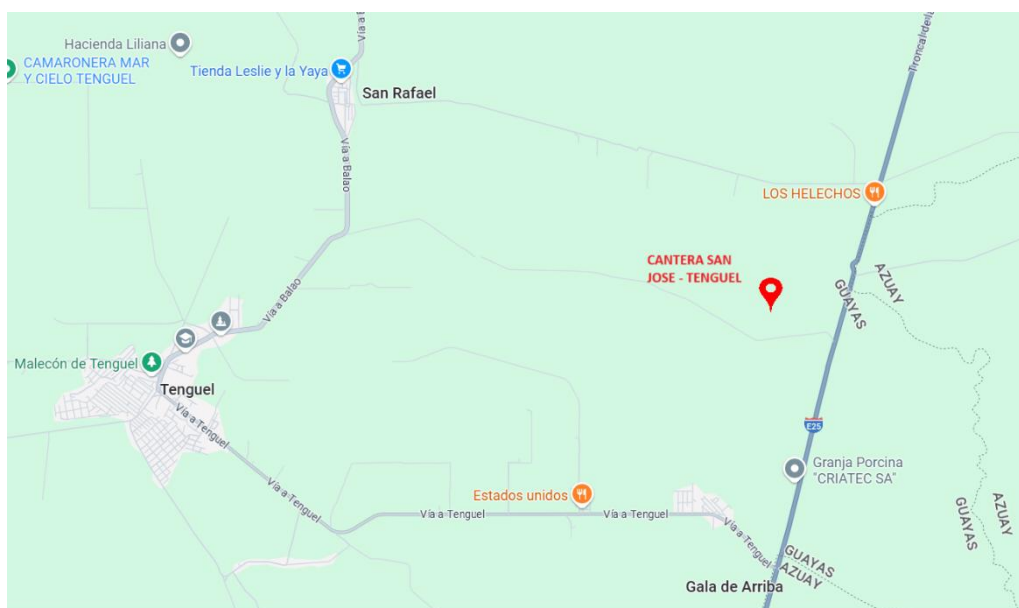


Ilustración 19. Ubicación de la cantera San José – Tenguel.

Fuente: Google Maps

4.4 Normativas vigentes para materiales de micropavimento

4.4.1 Normativas para agregados

Tabla 7. Normativa para ensayos de agregados.

ENSAYO	NORMA	
	ASSHTO	ASTM
Muestreo del agregado	T2	D75
Granulometría de los agregados	T 27	C 136
Análisis Granulométrico de los agregados finos	T 11	C 117
Ensayo de equivalente de arena de suelos y agregados finos	176	D 2419
Resistencia a la degradación con máquina de los Ángeles	T 96	C 131
Solidez de agregados por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	T 104	C 88

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143, (2010)

Adicional a los ensayos presentados en la **Tabla 7** se debe verificar la reactividad química de los finos, es decir del material pasante del tamiz N° 200, esto mediante el ensayo de azul de metileno de acuerdo a la norma (ISSA TB 145, 2013), donde se especifica el desempeño del agregado mediante el valor de azul de metileno obtenido después del ensayo de acuerdo a la **Tabla 8**.

Tabla 8. *Desempeño del material de acuerdo al valor de azul de metileno.*

Valor de Azul de Metileno (mg/g)	Desempeño anticipado
≤ 6	Excelente
7- 12	Marginalmente aceptable
13 - 19	Problemas/ Posible falla
≥ 20	Fallado

Fuente: (ISSA TB 145, 2013)

4.4.2 Normativas para asfalto emulsificado

Tabla 9. *Normativa para ensayos para asfalto emulsificado.*

ENSAYO	NORMA	
	ASSHTO	ASTM
Estabilidad de asentamiento y almacenamiento del asfalto emulsionado	T 59	D 6930
Destilación del asfalto emulsionado	T 59	D 6997
Ensayos en residuos de asfalto emulsionado		
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos	T 53	D 36
Penetración de materiales bituminosos a 77°F (25°C)	T 49	D 5

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010)

4.4.3 Normativas para diseño de la mezcla

Tabla 10. Pruebas de desempeño para mezcla de micropavimento.

ENSAYO	ISSA NO.	ESPECIFICACIÓN
Tiempo de mezcla a 77°F (25°C)	TB 113	Controlable hasta 120 segundos mínimo
Cohesión húmeda a 30 minutos mínimo (fraguado)	TB 139	12 kg-cm mínimo
Cohesión húmeda a 60 minutos mínimo (transito)	TB 139	20 kg-cm o mínimo de espín cercano
Pérdida por abrasión húmeda - Remojo de una hora	TB 100	50 g/ft ² (538 g/m ²) máximo
Pérdida por abrasión húmeda - Remojo de seis días	TB 100	75 g/ft ² (807 g/m ²) máximo
Asfalto excesivo por adhesión de arena LWT	TB 109	50 g/ft ² (538 g/m ²) máximo

Fuente: Norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010)

4.5 Caracterización de los agregados

4.5.1 Muestreo de los agregados de las canteras, Norma ASTM D - 75/ASSHTO T - 2

4.5.1.1 Descripción

El muestreo de agregados pétreos se realizó conforme a lo establecido en la norma (ASTM D-75, 2014) Método Estándar de Muestreo de Agregados, la cual define los métodos adecuados para obtener muestras representativas de agregados finos y gruesos, ya sea en estado suelto, en pilas de almacenamiento, bandas transportadoras, vehículos de transporte o depósitos de producción.

El muestreo es tan importante como la prueba y el muestreador deberá utilizar todas las precauciones para obtener muestras que muestren la naturaleza y el estado de los materiales que representan (ASTM D-75, 2014).

4.5.1.2 Equipos

- Sacos de polipropileno
- Fundas plásticas
- Palas

4.5.1.3 Ejecución

Se seleccionaron puntos representativos del lote, asegurando que la muestra recogida refleje de manera precisa las características físicas del material total. Para el caso del agregado que estaba ubicado en acopios, se evitó la toma superficial, y mediante una cargadora frontal se uniformizó el material como se muestra en la **Ilustración 20**.

La muestra se extrajo de al menos cinco ubicaciones diferentes de la pila (parte superior, media y base), las cuales fueron combinadas y homogeneizadas para formar la muestra compuesta.



Ilustración 20. Toma de muestra del agregado cantera San José - Tenguel.

Fuente: Elaboración Propia

Para los agregados sobre bandas transportadoras como la de la **Ilustración 21**, se debe detener el sistema para tomar cortes transversales completos de la banda y

recolectar todo el material a lo largo del ancho de la misma. Las muestras fueron recolectadas sin pérdida de material fino, evitando segregación o contaminación.



Ilustración 21. Producción de material en la Mina San José – Tenguel.

Fuente: Elaboración Propia

Las muestras fueron almacenadas en fundas de plástico con el fin de no perder finos ni humedad al momento de su transporte al laboratorio; estas fueron almacenadas dentro de sacos de polipropileno para evitar daños del contenido.

4.5.2 Granulometría de los agregados

4.5.2.1 Descripción

Este método de ensayo se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos para ser utilizados como áridos o que están siendo empleados como áridos. Los resultados se usan para determinar la concordancia de la distribución del tamaño de las partículas con los requerimientos de las especificaciones aplicables para proporcionar la información necesaria para controlar la producción de diversos productos de los áridos de mezclas que contengan áridos (ASTM C-136, 2019).

Una vez realizado el ensayo de granulometría de acuerdo a las normas correspondientes, se debe verificar que la curva granulométrica del material ensayado este dentro de los límites de alguno de los grupos de gradación presente

en la **Tabla 3** establecido por la Norma de rendimiento recomendada para micropavimentación (ISSA A143, 2010). El cumplimiento de esta condición es importante para garantizar la compatibilidad del agregado con los requerimientos del diseño de la mezcla de micropavimento.

4.5.2.2 Equipos

- Horno para secado de la muestra
- Balanza con sensibilidad 0.1 gr
- Tamices

4.5.2.3 Ejecución

El material recolectado en cada cantera fue transportado en sacos individuales y etiquetados hasta el laboratorio para su posterior análisis. Previamente los agregados fueron homogeneizados manualmente a fin de garantizar la uniformidad. Luego, se aplicó el procedimiento de reducción de muestra mediante cuarteo tal como se muestra en la

Ilustración 22, se obtuvieron dos muestras por cantera, que fueron utilizadas para el análisis granulométrico.

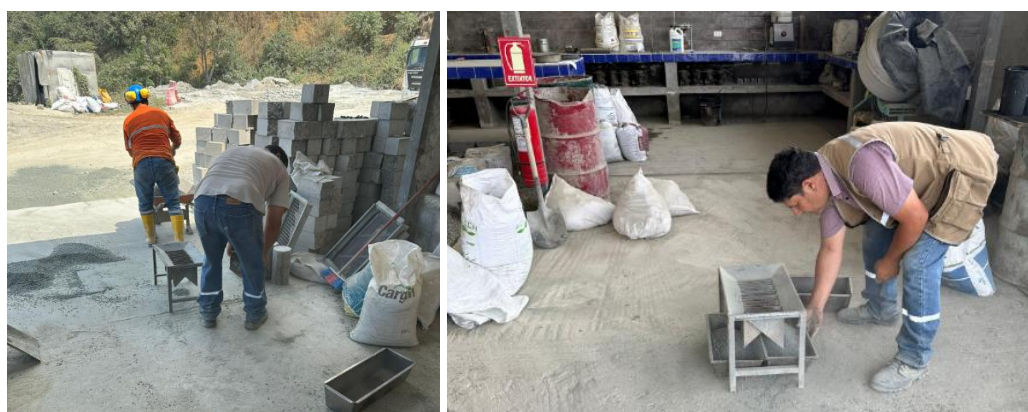


Ilustración 22. Cuarteo de las muestras de agregado.

Fuente: Elaboración Propia

Cada muestra fue introducida en un horno de secado, fijando la temperatura entre 105 °C y 110 °C durante un periodo de 12 a 24 horas, con el objetivo de eliminar la

humedad natural del material. Una vez alcanzado el tiempo estipulado, se dejó enfriar a temperatura ambiente, tal como establecen los procedimientos normalizados.

Posteriormente, se pesaron 1500 gramos de cada muestra, que fueron sometidos al ensayo de tamizado mecánico. El material se colocó en una serie de tamices organizados de mayor a menor abertura y se mantuvo agitación constante durante 10 minutos como se aprecia en la **Ilustración 23**. Al finalizar el proceso, se registró el peso retenido.

Con los resultados obtenidos de ambas muestras por cantera, se procedió a calcular el promedio por fracción retenida, lo que permitió determinar la distribución granulométrica representativa del agregado evaluado.



Ilustración 23. Tamizaje de muestras de agregado.

Fuente: Elaboración Propia

4.5.2.4 Resultados

Tabla 11. Granulometría del agregado de la cantera Rookaazul.

TAMAÑO TAMIZ		Retenido Parcial Peso Nº 1	Retenido Parcial Peso Nº 2	R. Parcial Corregido Peso Nº 1	R. Parcial Corregido Peso Nº 2	Peso Parcial Promedio	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
9.50	3/8"	5.87	0.00	5.90	0.00	2.95	0.20	0.20	99.80
4.75	4	378.84	349.89	380.70	380.02	380.36	25.78	25.98	74.02
2.36	8	508.82	483.93	511.32	525.60	518.46	35.14	61.12	38.88
1.18	16	261.99	239.85	263.27	260.50	261.89	17.75	78.87	21.13
0.60	30	118.26	120.15	118.85	130.50	124.67	8.45	87.32	12.68
0.30	50	81.37	64.63	81.77	70.20	75.98	5.15	92.47	7.53
0.15	100	47.06	37.96	47.29	41.23	44.26	3.00	95.47	4.53
0.08	200	29.97	23.62	30.12	25.65	27.89	1.89	97.36	2.64
PASA 200						38.95	2.64	100.00	
TOTAL MATERIAL		1500.58	1450.25	1500.58	1450.25	1475.42			

Fuente: Elaboración Propia

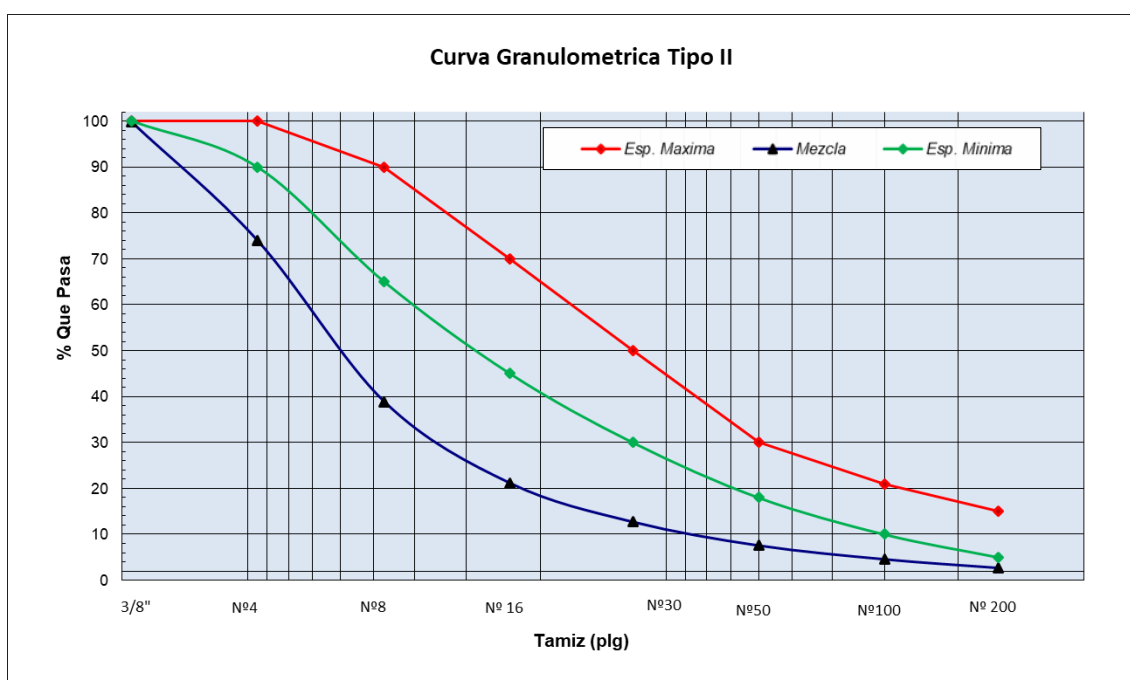


Ilustración 24. Faja granulométrica de micropavimento Tipo II del agregado de la Cantera Rookaazul.

Fuente: Elaboración Propia

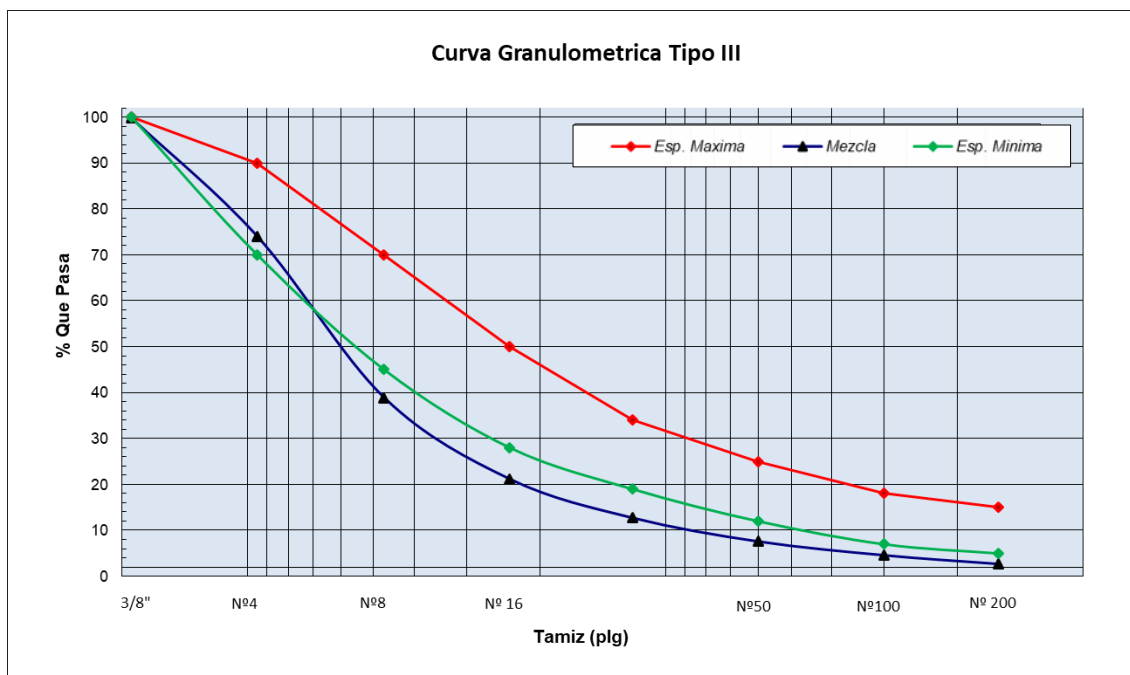


Ilustración 25. Faja granulométrica de micropavimento Tipo III del agregado de la Cantera Rookaazul.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12. Granulometría del agregado de la cantera Verdú.

TAMAÑO TAMIZ	Retenido Parcial Peso Nº 1	Retenido Parcial Peso Nº 2	R. Parcial Corregido Peso Nº 1	R. Parcial Corregido Peso Nº 2	Peso Parcial Promedio	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
9.50 3/8"	165.89	179.09	174.85	190.68	182.76	12.25	12.25	87.75
4.75 4	525.57	526.16	553.96	560.23	557.09	37.34	49.59	50.41
2.36 8	345.81	347.92	364.48	370.45	367.47	24.63	74.22	25.78
1.18 16	131.65	169.54	138.76	180.52	159.64	10.70	84.92	15.08
0.60 30	69.31	70.67	73.05	75.25	74.15	4.97	89.89	10.11
0.30 50	42.51	52.92	44.80	56.35	50.58	3.39	93.28	6.72
0.15 100	32.67	35.48	34.43	37.78	36.11	2.42	95.70	4.30
0.08 200	22.84	25.59	24.07	27.25	25.66	1.72	97.42	2.58
PASA 200					38.49	2.58	100.00	
TOTAL MATERIAL	1458.58	1525.32	1458.58	1525.32	1491.95			

Fuente: Elaboración Propia

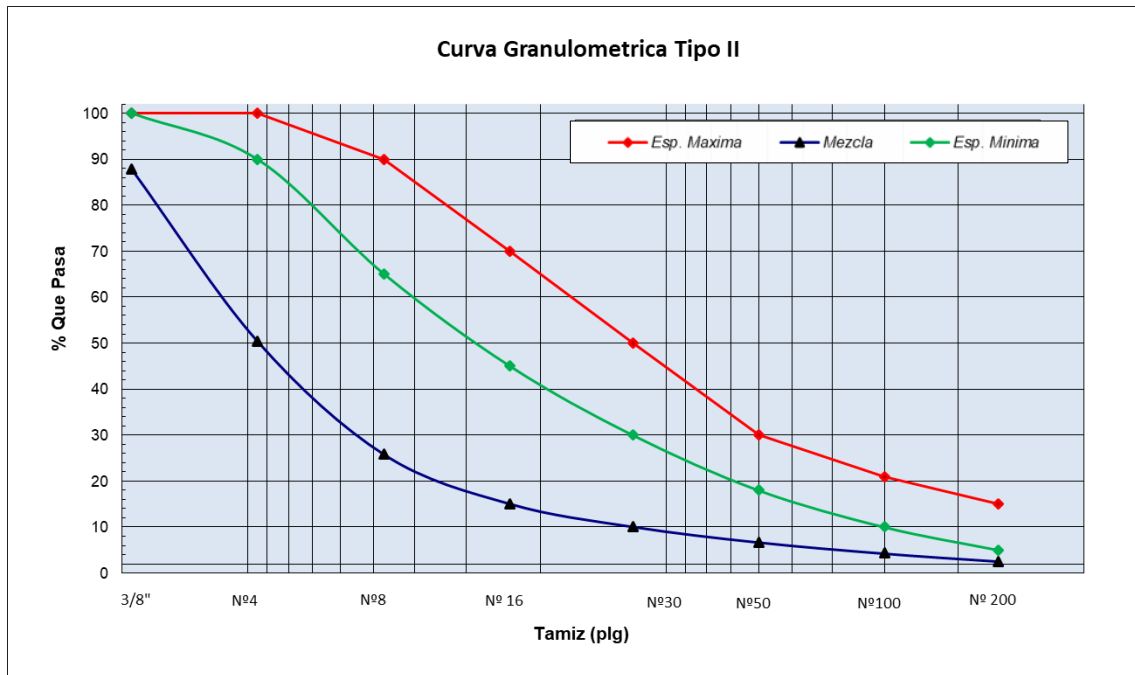


Ilustración 26. Faja granulométrica de micropavimento Tipo II del agregado de la Cantera Verdú.

Fuente: Elaboración Propia

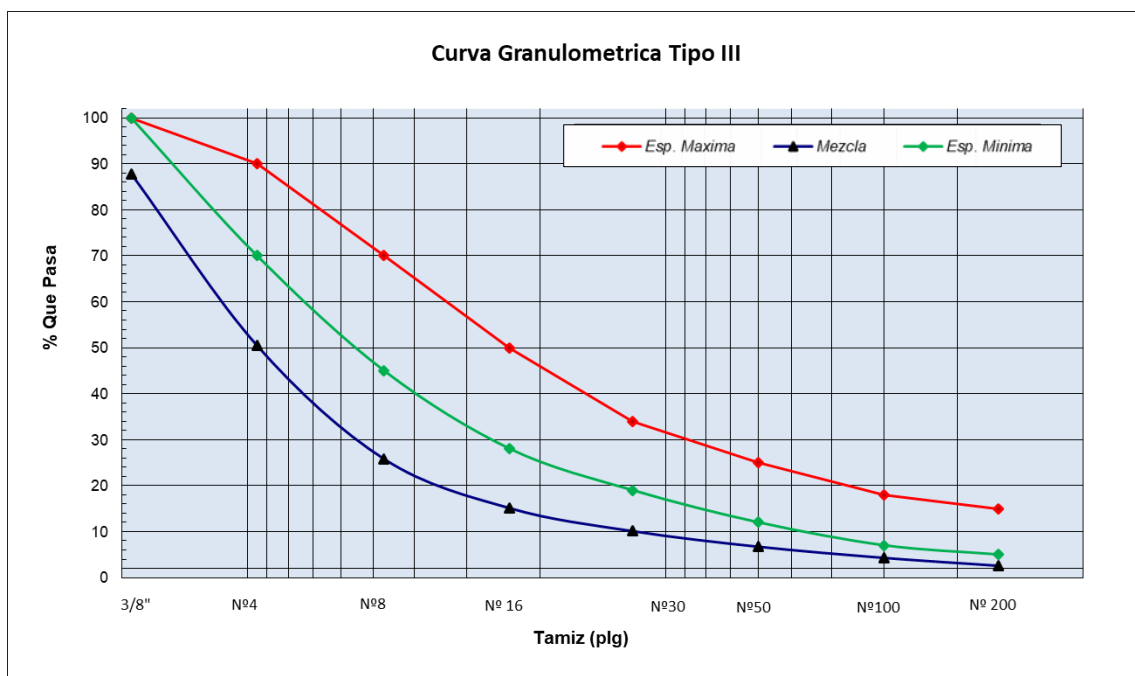


Ilustración 27. Faja granulométrica de micropavimento Tipo III del agregado de la cantera Verdú.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13. Granulometría del agregado de la cantera Techbuildres.

TAMAÑO TAMIZ		Retenido Parcial Peso Nº 1	Retenido Parcial Peso Nº 2	R. Parcial Corregido Peso Nº 1	R. Parcial Corregido Peso Nº 2	Peso Parcial Promedio	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
9.50	3/8"	2.28	0.00	2.44	0.00	1.22	0.08	0.08	99.92
4.75	4	441.24	327.03	471.37	350.12	410.75	26.96	27.04	72.96
2.36	8	421.45	327.13	450.24	350.23	400.23	26.27	53.31	46.69
1.18	16	205.27	205.58	219.29	220.10	219.69	14.42	67.73	32.27
0.60	30	130.39	123.48	139.29	132.20	135.75	8.91	76.64	23.36
0.30	50	92.64	80.04	98.96	85.69	92.33	6.06	82.70	17.30
0.15	100	70.40	69.21	75.21	74.10	74.65	4.90	87.60	12.40
0.08	200	76.56	64.78	81.79	69.35	75.57	4.96	92.56	7.44
PASA 200						113.35	7.44	100.00	
TOTAL MATERIAL		1490.50	1556.58	1490.50	1556.58	1523.54			

Fuente: Elaboración Propia

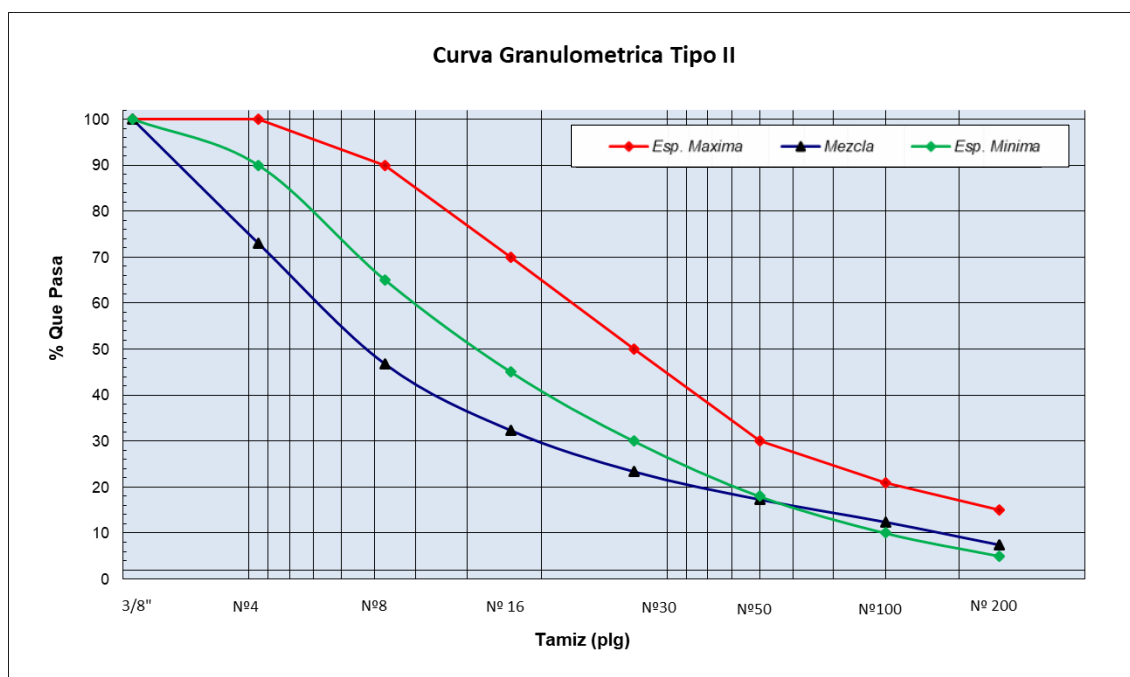


Ilustración 28. Faja granulométrica de micropavimento Tipo II del agregado de la cantera Techbuildres.

Fuente: Elaboración Propia

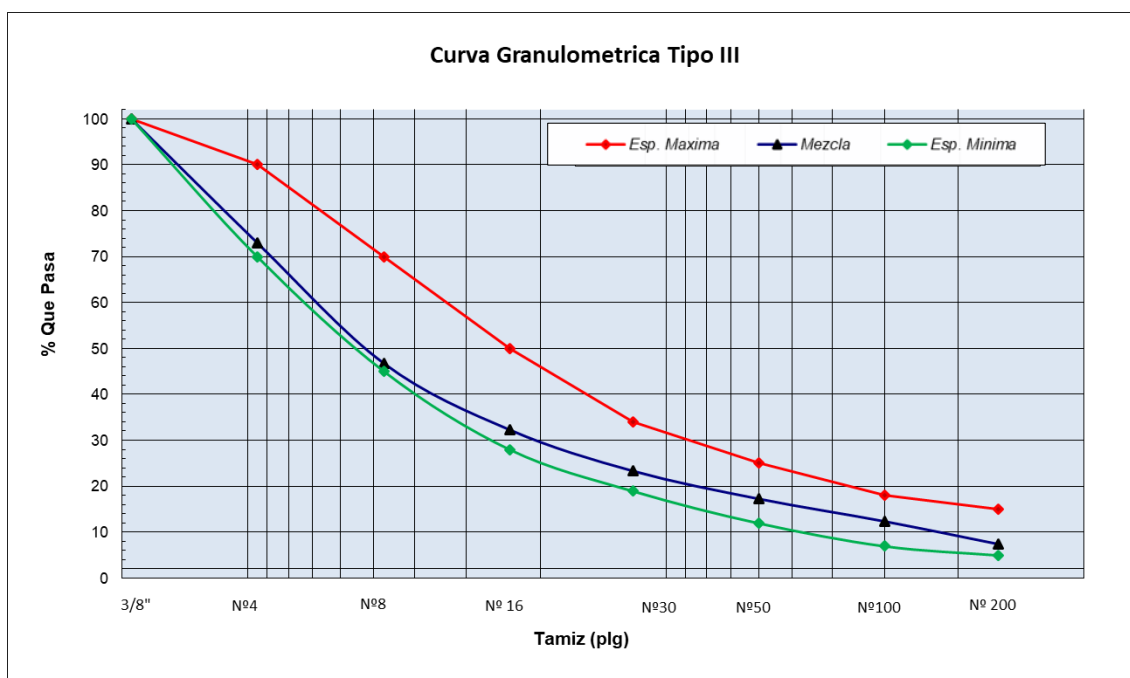


Ilustración 29. Faja granulométrica de micropavimento Tipo III del agregado de la cantera Techbuildres.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14. Granulometría del agregado de la cantera San José – Vía a la Costa.

TAMAÑO TAMIZ	Retenido Parcial Peso Nº 1	Retenido Parcial Peso Nº 2	R. Parcial Corregido Peso Nº 1	R. Parcial Corregido Peso Nº 2	Peso Parcial Promedio	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
9.50 3/8"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4.75 4	185.17	140.92	196.42	150.65	173.54	11.58	11.58	88.42
2.36 8	419.21	388.67	444.66	415.52	430.09	28.70	40.28	59.72
1.18 16	367.79	304.56	390.12	325.60	357.86	23.88	64.16	35.84
0.60 30	255.66	206.39	271.18	220.65	245.92	16.41	80.57	19.43
0.30 50	149.35	126.84	158.42	135.60	147.01	9.81	90.38	9.62
0.15 100	49.66	69.31	52.68	74.10	63.39	4.23	94.61	5.39
0.08 200	33.12	36.39	35.13	38.90	37.01	2.47	97.08	2.92
PASA 200					43.76	2.92	100.00	
TOTAL MATERIAL	1501.56	1495.60	1501.56	1495.60	1498.58			

Fuente: Elaboración Propia

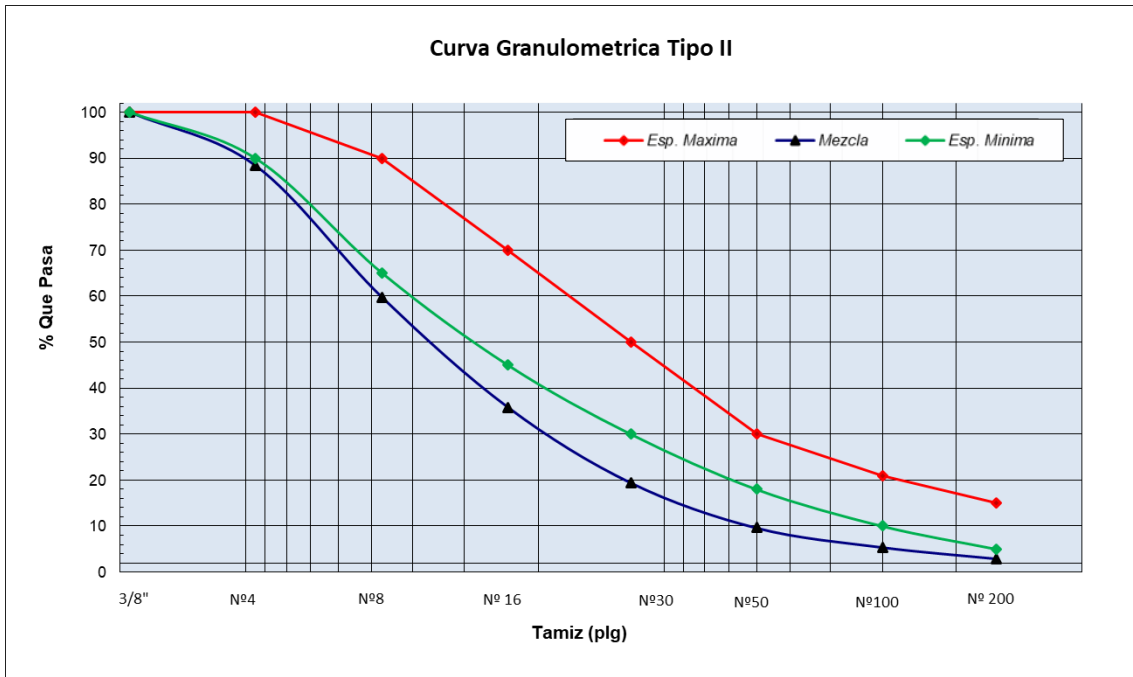


Ilustración 30. Faja granulométrica de micropavimento Tipo II del agregado de la cantera San José – Vía a la costa.

Fuente: Elaboración Propia

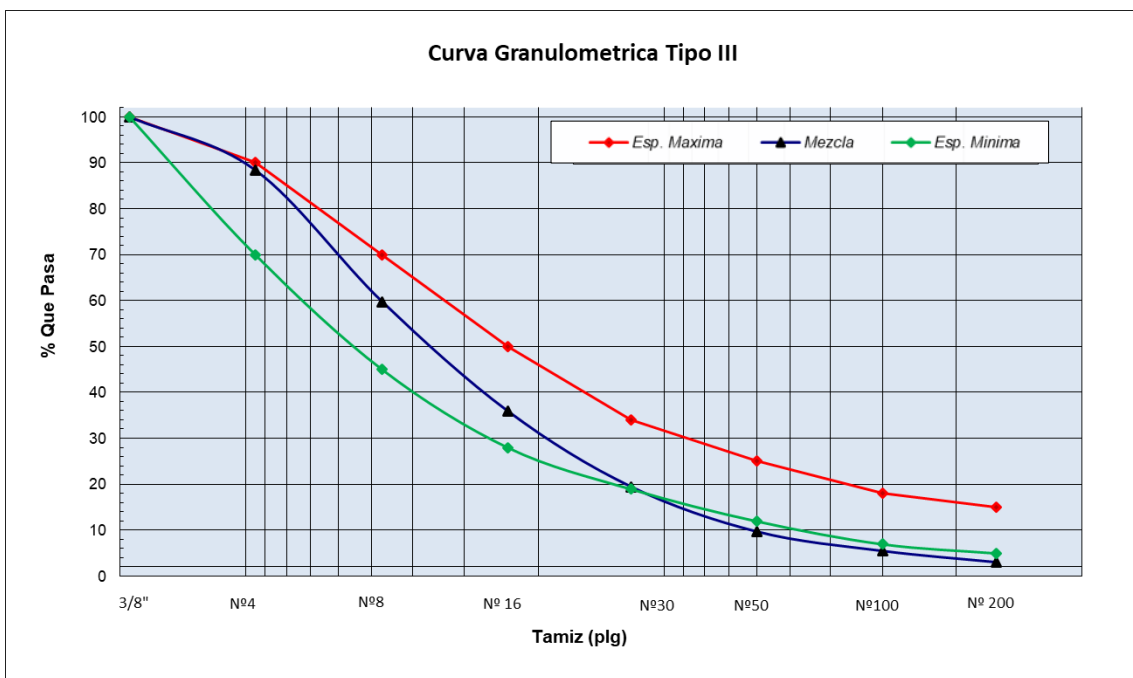


Ilustración 31. Faja granulométrica de micropavimento Tipo III del agregado de la cantera San José – Vía a la costa.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15. Granulometría del agregado de la cantera San José – Tenguel.

TAMAÑO TAMIZ	Retenido Parcial Peso Nº 1	Retenido Parcial Peso Nº 2	R. Parcial Corregido Peso Nº 1	R. Parcial Corregido Peso Nº 2	Peso Parcial Promedio	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
9.50 3/8"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	100.00
4.75 4	411.48	402.82	411.83	403.45	407.64	26.3	26.3	73.72
2.36 8	312.57	382.61	312.83	383.21	348.02	22.4	48.7	51.28
1.18 16	198.13	232.67	198.30	233.03	215.67	13.9	62.6	37.38
0.60 30	159.10	172.52	159.23	172.79	166.01	10.7	73.3	26.68
0.30 50	126.15	144.46	126.26	144.69	135.47	8.7	82.1	17.94
0.15 100	106.02	122.61	106.11	122.80	114.46	7.4	89.4	10.56
0.08 200	71.09	78.17	71.15	78.29	74.72	4.8	94.3	5.74
PASA 200					89.11	5.7	100.0	
TOTAL MATERIAL	1474.88	1627.31	1474.88	1627.31	1551.10			

Fuente: Elaboración Propia

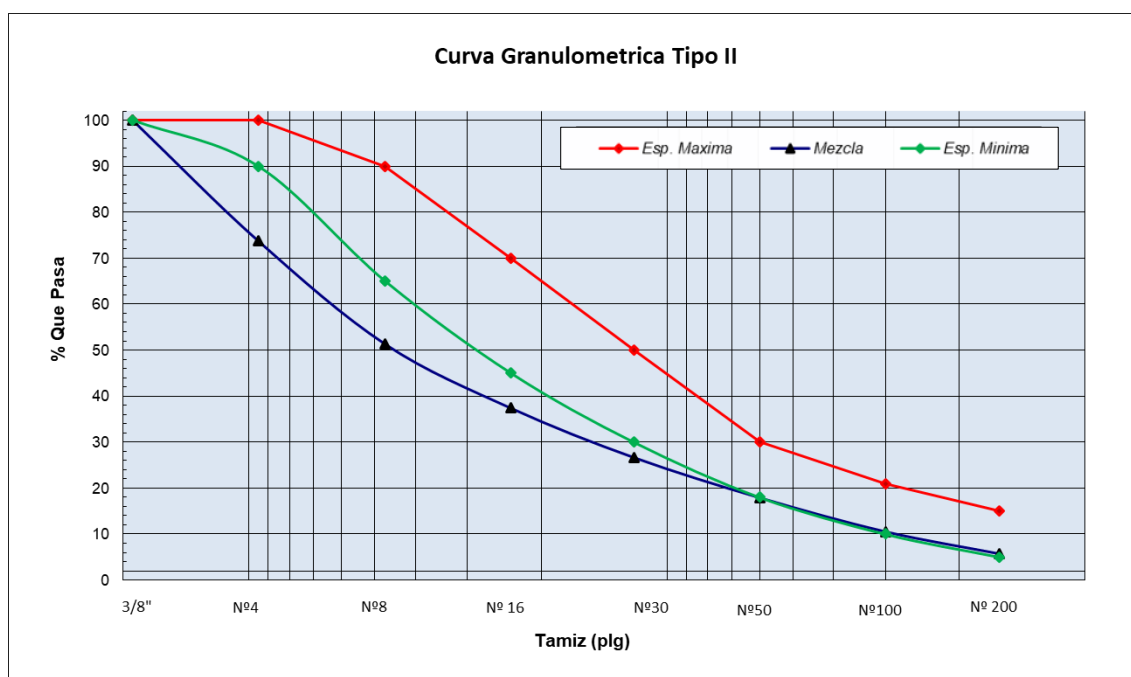


Ilustración 32. Faja granulométrica de micropavimento Tipo II del agregado de la cantera San José – Tenguel.

Fuente: Elaboración Propia

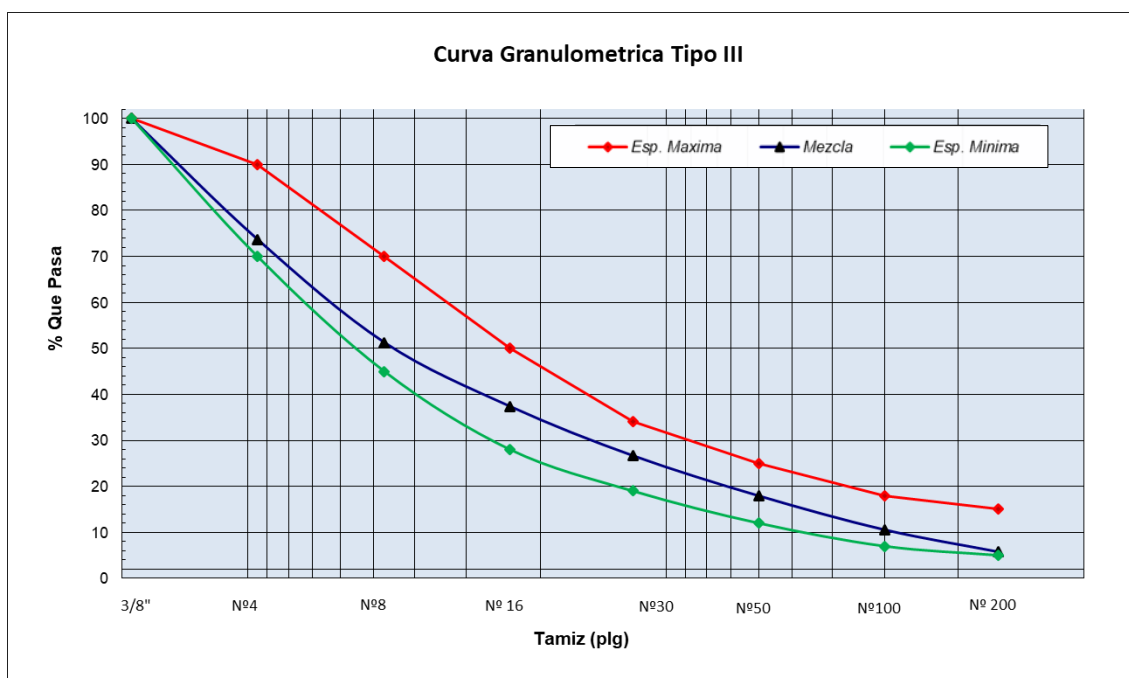


Ilustración 33. Faja granulométrica de micropavimento Tipo III del agregado de la cantera San José – Tenguel.

Fuente: Elaboración Propia

4.5.3 Índice de plasticidad de las canteras de acuerdo a la Norma ASTM D 4318

4.5.3.1 Descripción

El índice de plasticidad es un parámetro que refleja el intervalo de contenido de humedad en el cual un suelo de granulometría fina presenta comportamiento plástico. De acuerdo con la norma (ASTM D4318, 2008), este valor se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del suelo. Esta propiedad es clave para clasificar suelos según su grado de plasticidad y prever su respuesta ante cargas o presencia de humedad, particularmente en lo que respecta a su deformabilidad y estabilidad estructural.

4.5.3.2 Equipos

- Agua destilada
- Placa de vidrio

- Tamiz No 40
- Espátula
- Recipiente

4.5.3.3 Ejecución

El índice de plasticidad (IP) fue determinado de acuerdo a la norma (ASTM D4318, 2008), utilizando la fracción del material que pasa el tamiz N.º 40 (0,425 mm). Durante el procedimiento, en la etapa correspondiente a la determinación del límite plástico, se intentó conformar rollos de suelo de aproximadamente 3 mm de diámetro de las cinco muestras de material de las canteras; sin embargo, el material no mostró cohesión suficiente y se desmoronó antes de alcanzar dicho diámetro. Esta condición indica la ausencia de comportamiento plástico, razón por la cual el suelo se clasifica como no plástico (NP), es decir, con índice de plasticidad igual a cero.



Ilustración 34. Material no muestra cohesión para formar los rollos.

Fuente: Elaboración Propia

4.5.3.4 Resultados

Los materiales evaluados de las cinco minas presentaron un índice de plasticidad igual a cero ($IP = 0$), clasificándose como no plásticos (NP) según la norma ASTM D4318. Este resultado indica que los suelos carecen de comportamiento plástico, lo cual es favorable para su uso en capas base o soporte en tratamientos como el micropavimento.

4.5.4 Solidez del agregado por medio de sulfato de sodio de las canteras, Norma ASTM C - 88 /ASSHTO T - 104

4.5.4.1 Descripción

Este método de ensayo investiga los áridos con el fin de estimar su grado de desintegración cuando son sometidos a la acción del tiempo para el hormigón y otras aplicaciones. Se realiza sumergiéndolos repetidas veces en soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, seguido por un secado en horno con el fin de deshidratar parcialmente las sales precipitadas en los poros permeables del árido (ASTM C88, 2018).

4.5.4.2 Equipos

- Tamiz 1.18 mm (No. 16)
- Tamiz 600 μm (No. 30)
- Tamiz 2.36 mm (No. 8)
- Tamiz 4.75 mm (No. 4)
- Tamiz 9.5 mm (3/8 pulg)
- Recipientes
- Balanza con precisión de 0,1 g
- Horno de secado $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- Solución de Sulfato de sodio
- Solución de Cloruro de Bario
- Agua destilada

4.5.4.3 Ejecución

El ensayo de solidez en agregados finos utiliza el agregado que pasa por el tamiz de 3/8" (9,5 mm). Se realiza secado del material en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Posterior se deja el agregado a temperatura ambiente, se clasifica y separa en recipientes por tamaños mediante una serie de tamices de acuerdo a la norma (ASTM C88, 2018).

Se prepara una solución saturada de sulfato de sodio utilizando agua destilada como medio de disolución. La solución debe reposar por al menos 48 horas antes de su uso. Una vez lista la solución se procede a colocar en cada recipiente asegurando que el volumen cubra completamente el agregado con al menos 1,3 cm de exceso sobre el tamaño del agregado durante un mínimo de 16 horas y máximo 18 horas.



Ilustración 35. Saturación de las muestras por 16 horas.

Fuente: Elaboración Propia

Transcurrido este lapso, el material se retira, se deja secar al ambiente y se coloca la muestra en un horno a 110 ± 5 °C.

Este procedimiento se repite por un total de cuatro ciclos completos de inmersión y secado, utilizando la misma solución preparada inicialmente. Una vez finalizado el cuarto ciclo, el agregado se enfría a temperatura ambiente y se procede con una fase de enjuague mediante agua destilada limpia. Para verificar la completa remoción de los residuos de sulfato, se añade cloruro de bario para confirmar la ausencia de sulfatos remanentes, si al aplicar el cloruro de bario el líquido

permanece transparente, se confirma la ausencia de sulfatos remanentes; si presenta turbidez blanca, se debe repetir el lavado.

Concluida la limpieza, el agregado se seca nuevamente a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, y posteriormente se tamiza utilizando las mismas mallas aplicadas en la clasificación inicial. Se registra el peso retenido en cada tamiz y se compara con la masa original correspondiente a cada fracción. La diferencia de los dos valores representa la pérdida por acción del sulfato, y se expresa como porcentaje de pérdida de solidez de cada fracción granulométrica evaluada.

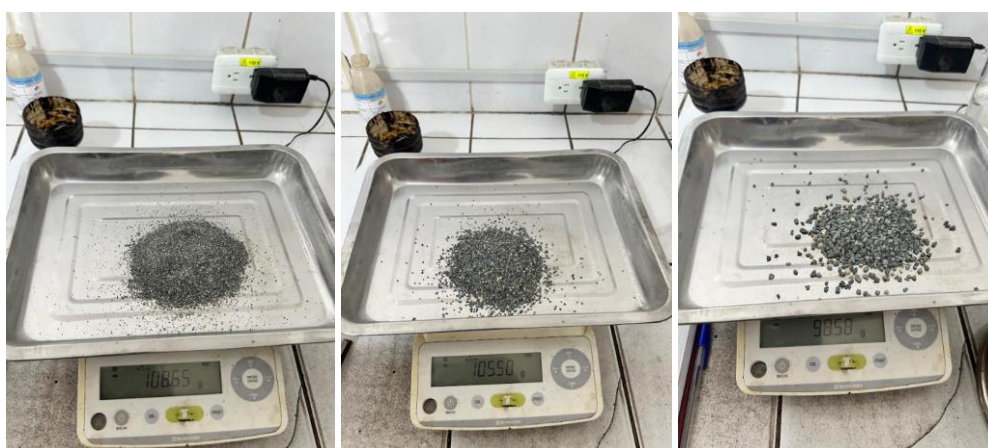


Ilustración 36. Peso de las muestras después del ensayo.

Fuente: Elaboración Propia

4.5.4.4 Resultados

Tabla 16. Solidez del agregado de la cantera Rookaazul.

Pasa	Retiene	% Retenido parcial del agregado (g)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	% Pasa el tamiz más fino	% Desgaste
3/8"	Nº 4	24.64%	110	106.2	3.45%	0.85%
Nº 4	Nº 8	21.13%	110	90.36	17.85%	3.77%
Nº 8	Nº 16	23.50%	110	105.65	3.95%	0.93%
Nº 16	Nº 30	22.85%	110	107.56	2.22%	0.51%
TOTAL						6.06%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 17. Solidez del agregado de la cantera Verdú.

Pasa	Retiene	% Retenido parcial del agregado (g)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	% Pasa el tamiz más fino	% Desgaste
3/8"	Nº 4	24.65%	110	108.41	1.45%	0.36%
Nº 4	Nº 8	21.65%	110	91.23	17.06%	3.69%
Nº 8	Nº 16	23.15%	110	105.45	4.14%	0.96%
Nº 16	Nº 30	21.56%	110	106.6	3.09%	0.67%
TOTAL						5.67%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Solidez del agregado de la cantera Techbuildres.

Pasa	Retiene	% Retenido parcial del agregado (g)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	% Pasa el tamiz más fino	% Desgaste
3/8"	Nº 4	23.58%	110	108.5	1.36%	0.32%
Nº 4	Nº 8	22.56%	110	93.45	15.05%	3.39%
Nº 8	Nº 16	24.89%	110	103.56	5.85%	1.46%
Nº 16	Nº 30	22.75%	110	107.5	2.27%	0.52%
TOTAL						5.69%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19. Solidez del agregado de la cantera San José – Vía a la costa.

Pasa	Retiene	% Retenido parcial del agregado (g)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	% Pasa el tamiz más fino	% Desgaste
3/8"	Nº 4	26.56%	110	107.8	2.00%	0.53%
Nº 4	Nº 8	25.68%	110	99.25	9.77%	2.51%
Nº 8	Nº 16	23.56%	110	105.6	4.00%	0.94%
Nº 16	Nº 30	21.35%	110	103.5	5.91%	1.26%
TOTAL						5.24%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20. Solidez del agregado de la cantera San José – Tenguel.

Pasa	Retiene	% Retenido parcial del agregado (g)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	% Pasa el tamiz más fino	% Desgaste
3/8"	Nº 4	24.50%	110	107.89	1.92%	0.47%
Nº 4	Nº 8	23.80%	110	98.58	10.38%	2.47%
Nº 8	Nº 16	24.10%	110	105.5	4.09%	0.99%
Nº 16	Nº 30	24.32%	110	108.65	1.23%	0.30%
TOTAL						4.23%

Fuente: Elaboración Propia

4.5.5 Abrasión mediante Máquina de los Ángeles de las canteras, Norma ASTM C- 131 /ASSHTO T- 96

4.5.5.1 Descripción

Este método de ensayo es una medida de la degradación de los áridos minerales de granulometría estándar. Estos resultados provienen de una combinación de acciones como abrasión o desgaste, impacto y trituración, efectuadas en un tambor de acero que contiene un número especificado de esferas de acero. El número de esferas depende de la granulometría de la muestra de ensayo (ASTM C-131, 2006).

4.5.5.2 Equipos

- Máquina para medida de abrasión (Los Ángeles)
- Juego de Tamices
- Balanza
- Esferas de acero

4.5.5.3 Ejecución

Se inicia con la selección de la cantidad de la muestra conforme a la fracción granulométrica establecida en la norma (ASTM C-131, 2006) conforme a la **Tabla 21**, se lava y se seca el material a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta obtener una

masa constante. Luego se introduce el material en el tambor giratorio de la máquina de los ángeles junto con una carga específica de esferas de acero normalizadas conforme se indica en la **Tabla 22**. El número de revoluciones del tambor es de 500 ciclos completos, realizados a una velocidad controlada.

Durante la rotación, la interacción entre el agregado y las esferas genera impactos y fricción que simulan las condiciones de desgaste mecánico en servicio. Al finalizar el ensayo, se extrae el agregado, se tamiza en la malla N.º 12 (1.70 mm) y se calcula el porcentaje que ha perdido en masa, comparando la masa inicial del agregado con la fracción retenida tras el ensayo.

Tabla 21. Gradación de las muestras del ensayo.

Pasa	Retenido	Granulometría A (g)	Granulometría B (g)	Granulometría C (g)	Granulometría D (g)
37.5 mm (1 1/2")	25.0 mm (1")	1.250 ± 25			
25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	1.250 ± 25			
19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	1.250 ± 10	2.500 ± 10		
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	1.250 ± 10	2.500 ± 10		
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")			2.500 ± 10	
6.3 mm (1/4")	4.75 mm (Nº4)			2.500 ± 10	
4.75 mm (Nº4)	2.36 mm (Nº8)				
-4.75 mm (Nº4)					5.000 ± 10

Fuente: (ASTM C-131, 2006)

Tabla 22. Especificaciones para la carga.

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: (ASTM C-131, 2006)

4.5.5.4 Resultados

Los agregados provenientes de las cinco canteras presentan valores de abrasión que se encuentran por debajo de lo especificado en la norma ISSA A143, (2010) donde indica que debe ser menor al 30%, como se puede observar en la **Tabla 23** se tiene valores superiores a lo especificado por la norma. Por lo tanto, los materiales ensayados son aptos en cuanto se refiere a la resistencia al desgaste para ser utilizados en mezclas de micropavimento.

Tabla 23. Resultados de abrasión de los agregados.

Cantera	Método	Peso de la muestra seca antes del ensayo (g)	Peso de la muestra después del ensayo (g)	Pérdida del peso de la muestra después del ensayo (g)	Valor de la abrasión (%)
Rookaazul	B	5000	4010.15	989.85	19.80%
Verdú	B	5000	3998.70	1001.30	20.03%
Techbuildres	B	5000	4002.45	997.55	19.95%
San José- Vía a la Costa	B	5000	3975.65	1024.35	20.49%
San José - Tenguel	B	5000	4152.50	847.50	16.95%

Fuente: Elaboración Propia

4.5.6 Azul de metileno de las canteras, Norma ISSA TB – 145

4.5.6.1 Descripción

Este método se utiliza para identificar la presencia de arcillas del grupo esmectita, materia orgánica o hidróxidos de hierro en los agregados, lo cual puede indicar su reactividad. Este método se utiliza para identificar la presencia de arcillas del grupo esmectita, materia orgánica o hidróxidos de hierro en los agregados, lo cual puede indicar su reactividad (ISSA TB 145, 2013).

4.5.6.2 Equipos

- Bureta de al menos 50 ml con divisiones de 0.1 ml
- Soporte para bureta
- Vaso de precipitación de 250 ml
- Agitador magnético y barra de agitación
- Balanza con sensibilidad de 0.01 g
- Varilla de vidrio redondeada
- Tamices de 75 μ m y 45 μ m
- Matraz aforado de 1000 ml
- Azul de metileno grado reactivo
- Agua destilada
- Papel filtro tipo Whatman N.º 40 o equivalente

4.5.6.3 Ejecución

Se prepara una solución con $1.00 \pm 0,01$ g de azul de metileno en 1000 ml de agua destilada, y se carga en una bureta. Se toma 1.00 ± 0.05 g de finos pasantes del tamiz N° 200, el material debe estar previamente secado en el horno, y se mezcla con 30 ± 0.1 g de agua destilada, se debe agitar por alrededor de 5 minutos.

Se dosifica 0.5 ml de la solución con agitación continua. Después de un minuto, se deposita una gota de la mezcla sobre papel filtro. Se observa la aparición del halo, el cual es un anillo azul claro que rodea la mancha, que indica que el material ha dejado de absorber el colorante. Si no aparece, se continúa agregando solución en incrementos de 0.5 ml hasta que se forme el halo. Se confirma con una segunda gota y se registra el volumen total usado.



Ilustración 37. Ensayo de azul de metileno.

Fuente: Elaboración Propia

El valor de azul de metileno se expresa en miligramos de colorante por gramo de fino.

4.5.6.4 Resultados

Tabla 24. Valores de Ensayo azul de metileno de los agregados.

Cantera	Resultado (mg-g)	Observación
Rookaazul	10	Marginalmente Aceptable
Verdú	10	Marginalmente Aceptable
Techbuildres	5	Excelente
San José – Vía a la costa	5	Excelente
San José - Tenguel	4	Excelente

Fuente: Elaboración Propia

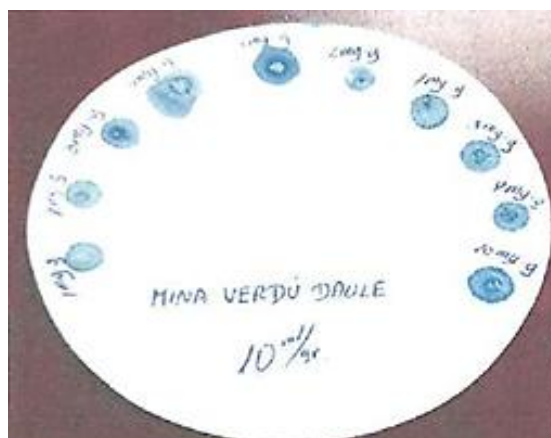


Ilustración 38. Resultado del agregado de la cantera Verdú.

Fuente: Elaboración Propia

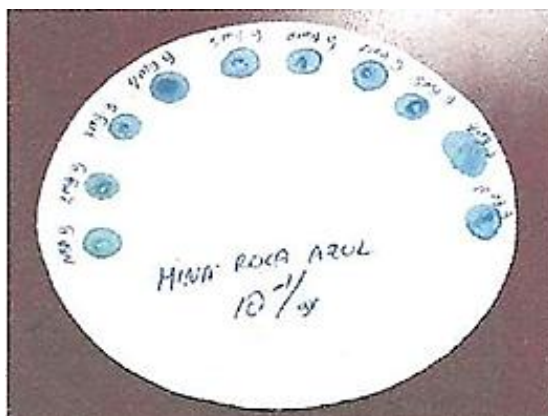


Ilustración 39. Resultado del agregado de la cantera Rookaazul.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 40. Resultado del agregado de la cantera Techbuildres.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 41. Resultado del agregado de la cantera San José – Vía a la costa.

Fuente: Elaboración Propia

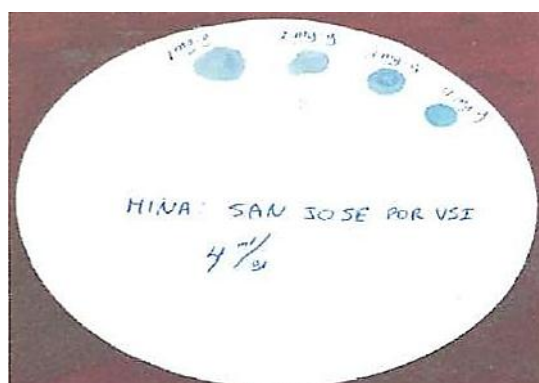


Ilustración 42. Resultado del agregado de la cantera San José – Tenguel.

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la **Tabla 24**, los resultados muestran que los valores de azul de metileno de las canteras Rookaazul y Verdú se encuentran dentro de los valores para un desempeño marginalmente aceptable. Esto sugiere que, aunque el material es aceptable y se lo puede utilizar, es necesario implementar medidas de control como lavado del material, mezcla con otros agregados o el uso de aditivos en la mezcla de micropavimento, de esta manera mejorara el valor obtenido y se garantizara una mayor adherencia en el uso de micropavimento.

La mina Techbuildres, San José – vía a la costa y San José - Tenguel obtuvieron valores menores a 6 mg/g que corresponden a un material con un desempeño excelente, recomendables para el uso en tratamientos superficiales con emulsión asfáltica; sin embargo, es importante analizar todos los parámetros que conlleva a la calificación del material para su uso en micropavimento.

4.5.7 Equivalente de arena de las canteras, Norma ASTM D 2419 /ASSHTO T 176

4.5.7.1 Descripción

Este método tiene la intención de servir como un ensaye rápido de correlación en campo. El propósito de este método de prueba es para indicar bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos y polvos de suelos granulares y agregados finos que pasan la malla N° 4 (4.75 mm). El término

“equivalente de arena” expresa el concepto de que muchos suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas deseables, arena, con arcilla o finos plásticos y polvo, no deseables (ASTM D- 2419, 2009).

4.5.7.2 Equipos

- Probeta transparente graduada con tapón de hule
- Sistema de sifón
- Embudo
- Agitador metálico
- Cronometro
- Tamiz #4
- Agua destilada
- Solución stock
- Horno

4.5.7.3 Ejecución

Para la preparación de la muestra, se obtiene aproximadamente 1500 gramos de material que pasa por el tamiz de 4.75 mm. Inicialmente, se tamiza el agregado para separar la fracción requerida, asegurándose de deshacer manualmente cualquier aglomerado presente en el material más grueso que logre pasar por la malla. Una vez obtenida la fracción fina, se procede a dividir el material mediante cuarteo hasta obtener cuatro porciones uniformes. A continuación, las muestras se secan en horno a 110 ± 5 °C y se dejan enfriar a temperatura ambiente antes de ser utilizadas en el ensayo.

Después, se introduce el material seco en una probeta cilíndrica graduada como se muestra en la **Ilustración 43**, previamente acondicionada con una cantidad de 102 ± 3 mm de solución estándar.



Ilustración 43. Colocación del material en probeta para ensayo.

Fuente: Elaboración Propia

El agregado se humedece completamente y se deja en reposo por 10 minutos y posteriormente se agita de forma manual mediante movimientos horizontales controlados 90 veces en 30 segundos, con el fin de desprender los finos adheridos a las partículas de arena.

Finalizada la agitación, se posiciona la probeta en forma vertical y se utiliza un irrigador especial para lavar internamente las paredes y generar un flujo que impulse hacia arriba las partículas finas, manteniéndolas en suspensión (véase **Ilustración 44**). Finalmente, la mezcla se deja en reposo por un lapso de 20 minutos, lo que permite la sedimentación de la arena en el fondo del recipiente, mientras que las partículas más finas permanecen suspendidas en la capa superior.



Ilustración 44. Uso del irrigador para limpiar las paredes de la probeta.

Fuente: Elaboración Propia

En caso de que, al cabo de los 20 minutos establecidos, no se distinga con claridad el límite entre la zona de arena y la capa de finos en suspensión, se debe extender el tiempo de reposo hasta que la división entre ambas capas sea claramente visible. Al cumplirse esta condición, se realiza de forma inmediata la medición de la altura correspondiente a la suspensión arcillosa y se registra el tiempo total que tomó el proceso de sedimentación. Si dicho tiempo supera los 30 minutos, será necesario repetir el ensayo, esta vez empleando tres muestras independientes provenientes del mismo lote de material.



Ilustración 45. Registro de altura para cálculo del equivalente de arena.

Fuente: Elaboración Propia

Después de realizar la lectura correspondiente a la altura de la suspensión de finos, se introduce cuidadosamente el pisón dentro de la probeta. Este debe descender lentamente, asegurándose de que no golpee la boca del cilindro durante su inserción. Una vez que el pisón hace contacto con la superficie de la arena sedimentada en el fondo, se inclina ligeramente hacia las graduaciones de la probeta para facilitar la lectura. A partir del valor indicado en el extremo superior del pisón, se restan 354 mm para obtener la lectura de arena, la cual se utiliza en el cálculo final del valor de equivalente de arena.

4.5.7.4 Resultados

Tabla 25. Resultado del ensayo de equivalente de arena del agregado de la cantera Rookaazul.

Descripción	Muestra N°	Muestra N°	Muestra N°	Muestra N°
	1	2	3	4
Lectura Arcilla	7.80 Pulgadas	6.75 Pulgadas	6.75 Pulgadas	7.40 Pulgadas
Lectura Arena	3.18 Pulgadas	3.00 Pulgadas	3.10 Pulgadas	3.20 Pulgadas
Equivalente de Arena	40.77%	44.44%	45.93%	43.24%
Promedio	43.60%			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26. Resultado del ensayo de equivalente de arena del agregado de la cantera Verdú.

Descripción	Muestra N°	Muestra N°	Muestra N°	Muestra N°
	1	2	3	4
Lectura Arcilla	5.85 Pulgadas	6.00 Pulgadas	6.40 Pulgadas	6.20 Pulgadas
Lectura Arena	3.00 Pulgadas	3.05 Pulgadas	3.10 Pulgadas	3.30 Pulgadas
Equivalente de Arena	51.28%	50.83%	48.44%	53.23%
Promedio	50.95%			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27. Resultado del ensayo de equivalente de arena del agregado de la cantera Techbuildres.

Descripción	Muestra N°	Muestra N°	Muestra N°	Muestra N°
	1	2	3	4
Lectura Arcilla	6.85 Pulgadas	6.80 Pulgadas	6.45 Pulgadas	6.60 Pulgadas
Lectura Arena	3.75 Pulgadas	3.70 Pulgadas	3.55 Pulgadas	3.60 Pulgadas
Equivalente de Arena	54.74%	54.41%	55.04%	54.55%
Promedio	54.69%			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 28. Resultado del ensayo de equivalente de arena del agregado de la cantera San José – Vía a la Costa.

Descripción	Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 3	Muestra N° 4
Lectura Arcilla	7.10 Pulgadas	6.40 Pulgadas	6.60 Pulgadas	6.70 Pulgadas
Lectura Arena	3.70 Pulgadas	3.55 Pulgadas	3.55 Pulgadas	3.60 Pulgadas
Equivalente de Arena	52.11%	55.47%	53.79%	53.73%
Promedio	53.78%			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 29. Resultado del ensayo de equivalente de arena del agregado de la cantera San José – Tenguel.

Descripción	Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 3	Muestra N° 4
Lectura Arcilla	6.55 Pulgadas	6.40 Pulgadas	6.60 Pulgadas	6.60 Pulgadas
Lectura Arena	4.35 Pulgadas	4.30 Pulgadas	4.25 Pulgadas	4.40 Pulgadas
Equivalente de Arena	66.41%	67.19%	64.39%	66.67%
Promedio	66.17%			

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con los resultados obtenidos del ensayo de equivalente de arena y conforme a lo establecido por la norma ISSA A143 (2010), que indica un valor mínimo del 65% para que un agregado fino sea apto para micropavimento, se observa que únicamente el material proveniente de la cantera San José - Tenguel cumple con dicho requisito, con un promedio de 66.17%. Este resultado evidencia una baja presencia de partículas plásticas o arcillosas.

Por el contrario, los materiales provenientes de las canteras Rookaazul, Verdú, San José – vía a la costa y Techbuildres presentan valores promedio de 43.60%, 50.95%, 53.78% y 54.69% respectivamente, todos por debajo del límite mínimo exigido. Estos bajos valores reflejan una alta proporción de finos plásticos, como arcillas,

que pueden absorber agua, reducir la cohesión entre los materiales y comprometer significativamente el desempeño estructural y funcional de la mezcla.

Para mejorar las características de estos agregados y permitir su posible uso en micropavimento, se pueden considerar varias alternativas técnicas. Una de los principales métodos es el proceso de lavar el agregado fino, que permite reducir el contenido de finos arcillosos adheridos a las partículas. Este procedimiento mejora directamente el equivalente de arena. Otra opción es mezclar el agregado existente con otro de mejor calidad, para elevar el valor promedio del equivalente de arena a niveles aceptables. También es recomendable implementar un control más estricto en el proceso de trituración, eliminando partículas demasiado finas o contaminadas.

4.6 Caracterización de la emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas son el resultado de la dispersión de pequeñas micropartículas de asfalto dentro de una matriz acuosa. Las emulsiones típicamente contienen entre un 40 % a un 75 % de asfalto y a temperatura ambiente presentan consistencia líquida que va desde fluida hasta muy viscosa. El tamaño de la partícula se encuentra en un rango desde 1 a 10 micrones de diámetro (Jimenez et al., 2016).

De acuerdo a la norma ISSA A143 (2010) para el micropavimento se debe utilizar asfalto emulsionado modificado con polímero y se debe considerar mínimo el 3% de sólidos de polímero.

Se empleará una emulsión asfáltica catiónica de rotura controlada, modificada con polímero elastomérico SBS proporcionado por la empresa EMULDEC. La incorporación de polímeros mejora significativamente el comportamiento del ligante frente a deformaciones, envejecimiento y condiciones climáticas adversas. Además, ofrece beneficios clave para el diseño de mezclas de micropavimento, como una rápida apertura al tráfico, mayor resistencia al desgaste y buena cohesión dentro de la mezcla, permitiendo así su evaluación en laboratorio bajo condiciones controladas.

Para el diseño de micropavimento la emulsión asfáltica debe cumplir una serie de exigencias, de acuerdo a la ISSA A143 (2010) se deben cumplir varios ensayos que se presentan en la **Tabla 9**.

4.6.1 Ensayo para determinar el porcentaje de asfalto residual. Norma ASTM D- 244 / AASHTO T- 59

4.6.1.1 Descripción

Este ensayo tiene como finalidad cuantificar el contenido de asfalto presente en una emulsión mediante un proceso de destilación que elimina el agua y los componentes volátiles. El residuo obtenido representa la fracción asfáltica, cuyo peso se compara con el de la muestra original para calcular su proporción. (ASTM D-244, 1999).

Este procedimiento es importante para el control de calidad, ya que asegura que la emulsión cumpla con las especificaciones técnicas requeridas. Además, proporciona información clave para el diseño de mezclas, la dosificación en obra y la evaluación del desempeño del tratamiento en pavimentos.

4.6.1.2 Equipo

- Varillas de acero
- Recipiente
- Horno
- Balanza

4.6.1.3 Ejecución

En la balanza registrar el peso de los recipientes y la varilla. Colocar aproximadamente 50 ± 1 gramos de emulsión asfáltica en los recipientes destinados al ensayo.

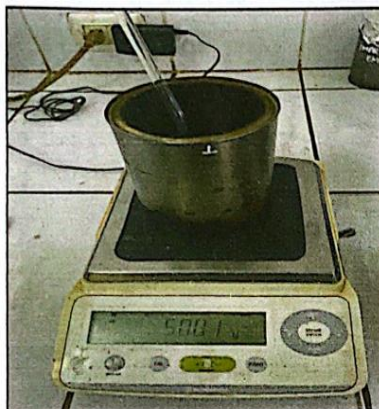


Ilustración 46. Peso de la emulsión asfáltica.

Fuente: Elaboración Propia

Introducir los recipientes en un horno previamente ajustado a una temperatura de $163\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y mantenerlos durante un periodo de 2 horas.

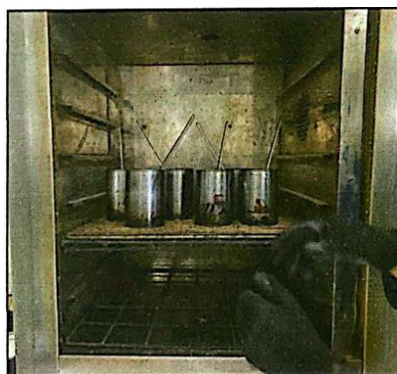


Ilustración 47. Secado de las muestras de emulsión asfáltica.

Fuente: Elaboración Propia

Transcurrido este tiempo, extraerlos con precaución, homogenizar el residuo presente en su interior y retornar al horno por una hora adicional. Finalmente, dejar enfriar a temperatura ambiente y proceder a realizar el pesaje final.

4.6.1.4 Resultados

Tabla 30. Resultado del ensayo de asfalto residual de la emulsión asfáltica CQS-1H-P.

Nº	Peso Tara (g)	Peso emulsión (g)	Peso tara + Emulsión después del horno (g)	% Residuo
1	108.93	49.99	140.1	62.35%
2	135.51	50.01	166.5	61.97%

3	108.69	49.99	139.55	61.73%
Promedio				62.02%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31. Resultado del ensayo de asfalto residual de la emulsión asfáltica CQS-1H-P(QK).

Nº	Peso tara (g)	Peso emulsión (g)	Peso tara + Emulsión después del horno (g)	% Residuo
1	110.1	49.65	140.84	61.91%
2	108.5	49.95	139.30	61.66%
3	108.65	50.02	139.94	62.55%
Promedio				62.04%

Fuente: Elaboración Propia

Según lo establecido en la norma ISSA A143 (2010), la emulsión asfáltica utilizada en mezclas de micropavimento debe contener un mínimo de 62 % de asfalto residual. Con base en los resultados obtenidos en los ensayos, se verifica el cumplimiento de lo especificado en la norma ISSA A143 (2010) para las dos emulsiones asfálticas al obtener valores superiores al 62% de asfalto residual.

4.6.2 Ensayo de estabilidad de asentamiento. Norma AASHTO T- 59/ ASTM D- 244

4.6.2.1 Descripción

Este ensayo tiene como propósito evaluar la estabilidad de la emulsión asfáltica durante el tiempo que permanece almacenada, verificando que sus componentes mantengan una distribución homogénea sin presentar segregación. Esta propiedad es clave para asegurar que la emulsión conserve su efectividad al momento de ser utilizada en obra, permitiendo una aplicación consistente y un comportamiento adecuado en la superficie tratada.

4.6.2.2 Equipo

- Probeta de 500 ml con tapón
- Varilla metálica
- Vasos de precipitación
- Balanza con capacidad para 500 gr
- Horno

4.6.2.3 Ejecución

Se introduce la emulsión en una probeta graduada hasta alcanzar un volumen de 500 ml. Luego, se cierra herméticamente el recipiente y se lo mantiene en reposo durante cinco días bajo condiciones de temperatura ambiente.



Ilustración 48. Colocación de emulsión asfáltica en la probeta graduada.

Fuente: Elaboración Propia

Transcurrido este periodo, se extrae cuidadosamente una muestra de la parte superior de la probeta una cantidad de 40 ml y se coloca en un vaso de precipitación previamente tarado. De igual forma se toma 40 ml de la parte inferior.

Ambos vasos, junto con sus respectivos agitadores, se colocan en un horno precalentado a $163\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un lapso de dos horas.

Al término del tiempo, se retiran del horno, se homogeniza el residuo con el agitador y se reincorporan al horno durante una hora adicional. Luego, se dejan

enfriar a temperatura ambiente para proceder con el pesaje final y se realizan los respectivos cálculos.

Este valor permite evaluar la uniformidad de la emulsión en condiciones de almacenamiento estático.

4.6.2.4 Resultados

Para calcular la estabilidad de la emulsión, se compara el contenido promedio de asfalto residual entre las muestras tomadas de la parte superior y aquellas obtenidas del fondo del cilindro. La diferencia entre ambos valores permite identificar posibles variaciones en la distribución del ligante durante el periodo de reposo.

Tabla 32. Resultado del ensayo de estabilidad de asentamiento de la emulsión CQS-1H-P.

Muestra	Peso tara (g)	Peso tara + emulsion (g)	Peso tara + Emulsión después del horno (g)	% Residuo
Inferior	100.5	152.62	132.80	61.97%
Superior	102.1	162.3	139.60	62.29%
Superior - Inferior				0.32%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 33. Resultado del ensayo de estabilidad de asentamiento de la emulsión CQS-1H-P(QK).

Muestra	Peso tara (g)	Peso tara + emulsión (g)	Peso tara + Emulsión después del horno (g)	% Residuo
Inferior	100.65	153.68	133.54	62.02%
Superior	100.4	151.23	132.12	62.40%
Superior - Inferior				0.38%

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la ISSA A143 (2010) el porcentaje máximo de este parámetro es del 1% y de acuerdo a los resultados de los ensayos indican que se cumple de acuerdo a lo especificado, pues se obtuvo un valor de 0.30% y 0.38% para la emulsión CQS-1H-P y CQS-1H-P(QK) respectivamente, lo cual indica que las emulsiones son estables; es decir los componentes (asfalto, agua, emulsificante y aditivos) permanecen uniformemente distribuidos.

4.6.3 Ensayo de reblandecimiento del bitumen. Norma ASTM D-36 / AASHTO T-53

4.6.3.1 Descripción

Los betunes son materiales viscoelásticos sin puntos de fusión bien definidos; gradualmente se vuelven más suaves y menos viscosos a medida que aumenta la temperatura. Por esta razón, los puntos de reblandecimiento deben determinarse mediante un método arbitrario y estrechamente definido para que los resultados sean reproducibles (ASTM D36, 2006).

El punto de ablandamiento se define como la temperatura en la que el ligante asfáltico alcanza una consistencia tal que permite el desplazamiento de una esfera metálica normada, cuyo diámetro es de 3/8 de pulgada y una masa aproximada de 3.5 gramos, a través de un anillo normalizado que contiene la muestra. Este anillo posee un diámetro interno de 5/8 de pulgada y una altura de 1/4 de pulgada, y su función es contener el asfalto durante el proceso de calentamiento.

4.6.3.2 Equipo

- Vaso de precipitación de 600 ml o 800 ml
- Barra de agitación
- Soporte mecánico
- 2 anillos apoyados de latón
- 2 bolas de acero inoxidable

- Espátula
- Agua destilada
- Termómetro
- Cocina
- Recipiente metálico

4.6.3.3 Ejecución

El procedimiento inicia con el calentamiento cuidadoso del betún obtenido del ensayo de determinación del porcentaje de asfalto residual de acuerdo a la norma (ASTM D-244, 1999) de cada muestra de emulsión asfáltica, asegurando una agitación continua para evitar zonas de sobrecalentamiento y la incorporación de aire al material. Una vez que el ligante adquiere la fluidez necesaria, se vierte en los moldes metálicos normalizados con forma de anillo, procurando un leve exceso en el llenado. Las muestras se mantienen en reposo a temperatura ambiente por al menos treinta minutos, con el fin de asegurar un enfriamiento homogéneo y la solidificación adecuada del material.

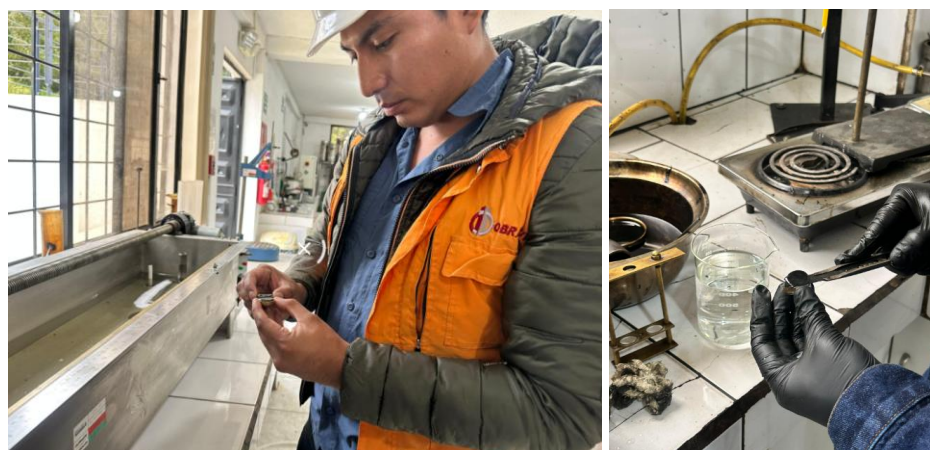


Ilustración 49. Colocación del material en los moldes.

Fuente: Elaboración Propia

Luego del enfriamiento, se procede a nivelar la superficie del betún en cada anillo utilizando una espátula para que el material quede completamente al ras con los bordes del molde. Una vez preparadas las muestras, se ensamblan en el dispositivo

de ensayo, colocándolas junto con las bolas metálicas en sus respectivas guías de centrado. El conjunto se introduce en un baño con agua destilada, y se posiciona un termómetro calibrado para monitorear con precisión el aumento de la temperatura.



Ilustración 50. Ensamble de la muestra en el dispositivo de ensayo.

Fuente: Elaboración Propia

El sistema se somete a un calentamiento progresivo variando 5 °C por minuto. A medida que la temperatura del agua aumenta.



Ilustración 51. Calentamiento de la muestra junto con las bolas de acero.

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del ensayo se obtiene en el momento exacto en que el betún alcanza un grado tal de reblandecimiento que permite el desplazamiento de la bola metálica hasta el fondo del recipiente.



Ilustración 52. Desplazamiento de la bola al fondo y toma del registro de la temperatura.

Fuente: Elaboración Propia

La temperatura registrada en ese instante representa el punto de ablandamiento del material.

4.6.3.4 Resultados

Para el ensayo se tomaron dos muestras de dos lotes diferentes de asfalto; estos fueron previamente modificados con polímero SBS para mejorar sus características; el primer lote se utilizó para la fabricación de emulsión CQS-1H-P y el segundo lote se utilizó para la fabricación de emulsión CQS-1H-P(QK).

Tabla 34. Resultado del ensayo de reblandecimiento del asfalto residual de la emulsión CQS-1H-P.

Muestra	Reblandecimiento °C
1	58
2	56
Promedio	57

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 35. Resultado del ensayo de reblandecimiento del asfalto residual de la emulsión CQS-1H-P(QK).

Muestra	Reblandecimiento °C
1	59
2	55
Promedio	57

Fuente: Elaboración Propia

Según lo establecido en la norma ISSA A-143 (2010), en el apartado correspondiente a los ensayos de calidad para residuos asfálticos, el valor mínimo aceptable para el punto de reblandecimiento del asfalto es de 57 °C. Los resultados obtenidos en este análisis evidencian que los materiales evaluados alcanzan una temperatura de reblandecimiento de 57 °C, cumpliendo con el valor mínimo exigido. Este comportamiento confirma que son asfaltos modificados con polímeros pues presentan características con parámetros que están dentro los rangos admisibles para su uso en la fabricación de emulsiones asfálticas para micropavimento.

4.6.4 Ensayo de penetración de material bituminoso. Norma ASTM D- 5 / AASHTO T-46

4.6.4.1 Descripción

La prueba de penetración se utiliza como medida de consistencia. Valores más altos de penetración indican una consistencia más blanda (ASTM D-5, 2013).

El ensayo proporciona el valor de la dureza relativa del betún y es fundamental para clasificar su grado de penetración, lo cual influye directamente en su desempeño frente a variaciones térmicas y condiciones de carga en obras de pavimentación.

4.6.4.2 Equipo

- Penetrómetro
- Aguja normalizada

- Recipiente
- Termómetro
- Cronometro
- Capsula de transferencia

4.6.4.3 Ejecución

Para iniciar el procedimiento, el material bituminoso obtenido previamente de las emulsiones analizadas mediante el ensayo de determinación del porcentaje de asfalto residual de acuerdo a la norma (ASTM D-244, 1999) se calienta en un recipiente, se debe asegurar una agitación constante para evitar sobrecalentamientos. La temperatura del material no debe exceder los 60 °C, y el tiempo total de calentamiento no debe superar los 60 minutos. Una vez alcanzada la consistencia adecuada, el material bituminoso se vierte en moldes metálicos cilíndricos cuya profundidad sea al menos 10mm mayor que la profundidad a la que se espera que la aguja penetre.

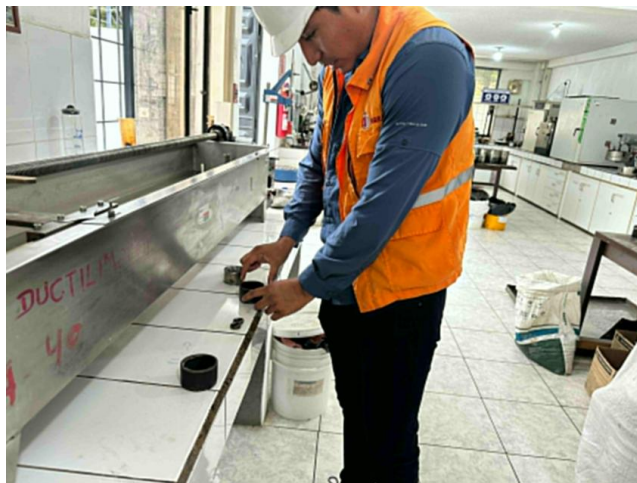


Ilustración 53. Vertido del material en los moldes.

Fuente: Elaboración Propia

Las muestras se enfrían a temperatura ambiente, manteniéndose dentro de un rango controlado de 15 a 30 °C.



Ilustración 54. Muestras en etapa de enfriamiento.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez solidificada la muestra, se prepara el equipo de medición. En caso de utilizar un penetrómetro con baño, el recipiente con la muestra se coloca directamente sobre el soporte del equipo y se sumerge completamente en agua a temperatura constante. Si se trabaja con un penetrómetro fuera del baño, se emplea una cápsula de transferencia para colocar el recipiente, asegurando que esté completamente cubierto por agua antes de instalarla en el soporte del instrumento.



Ilustración 55. Colocación del asfalto en el equipo de medición.

Fuente: Elaboración Propia

Antes de cada medición, se debe verificar el correcto funcionamiento del dial y asegurar que esté calibrado. La aguja del penetrómetro se descende de forma controlada hasta que la punta haga un contacto leve con la superficie del material bituminoso.



Ilustración 56. Descenso de la aguja hasta la superficie de la muestra para medición.

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se libera de forma rápida el mecanismo de sujeción de la aguja y se deja actuar durante un tiempo estándar de cinco segundos bajo una carga de 100 gramos, todo ello a una temperatura de referencia de 25 °C, salvo que se especifiquen otras condiciones.



Ilustración 57. Liberación de la aguja segundos sobre la muestra por cinco.

Fuente: Elaboración Propia

El valor de penetración se registra en décimas de milímetro como la distancia recorrida por la aguja en ese tiempo. En caso de que el recipiente se desplace durante la prueba, el resultado debe descartarse.



Ilustración 58. Registro de valores de penetración.

Fuente: Elaboración Propia

Para obtener resultados representativos, se deben realizar al menos tres mediciones en puntos distintos de la superficie, asegurando que cada punto esté a una distancia mínima de 10 mm entre sí y de los bordes del recipiente.

4.6.4.4 Resultados

Tabla 36. Resultado del ensayo de penetración del asfalto residual de la emulsión CQS-1H-P.

Penetración, 25°C, 100 g, 5 s	
1	75
2	65
3	70
Promedio	70

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37. Resultado del ensayo de penetración del del asfalto residual de la emulsión CQS-1H-P(QK).

Penetración, 25°C, 100 g, 5 s	
1	82
2	62
3	70
Promedio	71

Fuente: Elaboración Propia

Según la norma ISSA A143 (2010), el rango de penetración del residuo de emulsión asfáltica debe estar entre 40 a 90 décimas de milímetro. Es importante indicar que valores por debajo del rango indican que el ligante es demasiado duro lo que provocará la reducción de la flexibilidad y como consecuencia probabilidad de fisuración ante los cambios de temperatura, además de la dificultad para lograr una buena cohesión con el agregado.

Por otro lado, si se tienen valores superiores al rango permitido, es una señal de ligantes demasiado blandos, lo que provocará menor resistencia al desgaste por tránsito lo que conlleva a una menor vida útil del tratamiento superficial.

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que las dos muestras de asfalto modificado con polímeros está dentro del rango de tolerancia.

4.7 Análisis y comportamiento de la mezcla

Para evaluar el comportamiento y desempeño de la mezcla, se llevaron a cabo una serie de ensayos específicos. Para ello, se seleccionó el agregado proveniente de la cantera San José, al ser el único que cumple con todos los requisitos técnicos establecidos. La emulsión utilizada corresponde al tipo CQS-1H-P y CQS-1H-P(QK), de curado controlado.

El análisis se enfoca en el diseño de un micropavimento Tipo III, ya que la granulometría del agregado seleccionado se ajusta a las especificaciones requeridas para esta clasificación.

4.7.1 Porcentaje teórico de emulsión en la mezcla de micropavimento

Para la determinación del porcentaje teórico de emulsión se realizó mediante el método Hveem, mismo que está descrito en la norma. El método de Hveem incorpora una estimación indirecta del contenido de asfalto en función de la superficie específica del agregado. Esta superficie se calcula tras realizar una clasificación granulométrica, registrando el peso de los materiales retenidos en cada malla. Luego, mediante coeficientes conocidos como factores de área

superficial, asignados según el tamaño de partícula se obtiene una aproximación del área total expuesta por el agregado (Asphalt Institute, 1982).

Tabla 38. Factores de área superficial basado en el tamaño del tamiz.

Sieve Size	Surface Area Factor (ft ² /lb)	Surface Area Factor (m ² /kg)
3/8-in. (9.5 mm)	2	0.41
No. 4 (4.75 mm)	2	0.41
No. 8 (2.36 mm)	4	0.82
No. 16 (1.18 mm)	8	1.64
No. 30 (600 μm)	14	2.87
No. 50 (300 μm)	30	6.14
No. 100 (150 μm)	60	12.29
No. 200 (75 μm)	160	32.77

Fuente: (ISSA TB-118, 2005)

Tabla 39. Superficie teórica del agregado de la cantera San José – Tenguel.

TAMAÑO TAMIZ	% Pasa	Facto Hveen	% Pasa* Factor Hveen
9.50 3/8"	100.00	0.02	2.00
4.75 4	73.72	0.02	1.47
2.36 8	51.28	0.04	2.05
1.18 16	37.38	0.08	2.99
0.60 30	26.68	0.14	3.73
0.30 50	17.94	0.30	5.38
0.15 100	10.56	0.60	6.34
0.08 200	5.74	1.60	9.19
		S.T.A	33.15

Fuente: Elaboración Propia

Espesor de la película de asfalto en el agregado (t) =	4.9 micrones
Gravedad específica del asfalto (ASG)=	1.003 gr/cm ³
Porcentaje de asfalto residual de la emulsión (AR)=	62.00 %
Absorción de kerosene en el agregado (KA)=	4.70 %
Coefficiente de conversión de unidades=	0.02047

Los requisitos de absorción del árido se determinan mediante la Prueba de Equivalente de Queroseno Centrifugo. En esta prueba, se centrifugan 100 g de material de calibre inferior al N° 4 (4.75 mm) en presencia de queroseno durante 2 minutos. La cantidad de queroseno retenida por el árido se aproxima a la cantidad de betún que el agregado absorberá. El queroseno absorbido (KA) por el agregado se convierte a un porcentaje del peso seco del agregado (ISSA TB-118, 2005).

Con base en estos parámetros, se determina la cantidad de asfalto residual necesaria para cubrir adecuadamente la superficie específica del agregado. El cálculo del área superficial que debe ser recubierta por el ligante se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$\% L = (S.T.A * t * (0.02047) * (ASG)) + KA$$

Ecuación 1

Se determina un contenido de asfalto residual de 8.04 %, este valor se utiliza para obtener el porcentaje de emulsión teórico, y se determina mediante la siguiente formula:

$$\% Emulsion = \frac{(\% L * 100)}{\% AR}$$

Ecuación 2

Se define un contenido teórico inicial de emulsión del 12.96 % para el agregado procedente de la cantera San José, el cual sirve como punto de partida en el proceso de diseño de la mezcla. Este valor guía la selección de los intervalos de dosificación utilizados en los ensayos de laboratorio, en los que se ajusta gradualmente la proporción de emulsión con el fin de analizar el comportamiento de la mezcla frente a variables clave como cohesión, resistencia a la abrasión, tiempo de curado y facilidad de aplicación.

4.7.2 Humedad óptima en la mezcla. Norma ISSA TB- 106

4.7.2.1 Descripción

El ensayo evalúa la capacidad de la mezcla para extenderse de manera uniforme, mide la consistencia, expresada en centímetros (ISSA TB- 106, 2012).

Una consistencia apropiada es esencial para asegurar que el material se aplique de forma continua y controlada sobre la superficie de rodadura, minimizando riesgos de separación de componentes o formación de acumulaciones que puedan comprometer la calidad del acabado.

4.7.2.2 Equipos

- Balanza con capacidad de 1000 g con precisión de 0.1 g
- Cuchara o espátula para mezclar
- Cono de metal de absorción de arena
- Escala de flujo con siete círculos concéntricos
- Contenedor para mezcla
- Cronometro

4.7.2.3 Ejecución

La ejecución del ensayo inicia con la preparación de una muestra compuesta por 400 gramos de material pétreo. Este se combina, bajo condiciones ambientales, con la proporción establecida de emulsión y variaciones en el contenido de agua, con el fin de analizar el efecto de estos ajustes en las propiedades de la mezcla. Cada muestra debe mezclarse de manera uniforme durante un tiempo máximo de 30 segundos.



Ilustración 59. Cono de metal y escala de flujo para ensayo.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 60. Preparación de la muestra.

Fuente: Elaboración Propia

Se procede a llenar el cono metálico y se lo ubica en el centro de la base graduada en centímetros. El llenado debe realizarse sin compactar el material, permitiendo que asiente de forma natural; luego se retira el cono de manera vertical y sin movimientos bruscos.



Ilustración 61. Colocación de la muestra dentro del cono metálico.

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se mide el alcance de la mezcla en cuatro direcciones equidistantes separadas a 90 grados. Las lecturas se promedian y se registran en centímetros.

La consistencia adecuada es cuando el flujo radial promedio da como resultado un valor de 2.5 cm, siendo aceptables valores dentro del rango de 2.9 a 3.0 cm, con una tolerancia de ± 0.25 cm entre repeticiones. Esta medida permite evaluar la trabajabilidad de la mezcla y su aptitud para ser aplicada en condiciones de obra.

4.7.2.4 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

Considerando el área superficial del agregado para el cálculo del Porcentaje Teórico de Emulsión se obtuvo 12.96% de emulsión óptima teórica. Con este dato se realizaron las primeras pruebas de compatibilidad agregado y emulsión, se evidencia un exceso de emulsión, por tal motivo se realizó varias mezclas variando emulsión y se observó que con 10.8% de emulsión CQS-1H-P y 1.1% de cemento portland se tiene una mezcla con buena trabajabilidad, con este porcentaje de emulsión se realizó mezclas variando el porcentaje de agua para realizar el ensayo.



Ilustración 62. Ensayo de consistencia para diferentes porcentajes de agua añadida. a) 8% Agua añadida b) 9% Agua añadida c) 10 % Agua añadida

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 40. Resultados del ensayo de contenido de humedad optima con emulsión CQS-1H-P y agregado de la cantera San José – Tenguel.

Agregado	Cemento	Agua	Emulsión CQS-1H-P	Consistencia (cm)
100%	400	7.0%	10.8%	0.00
100%	400	8.0%	10.8%	1.20
100%	400	9.0%	10.8%	2.50
100%	400	10.0%	10.8%	3.50
100%	400	11.0%	10.8%	4.20

Fuente: Elaboración Propia

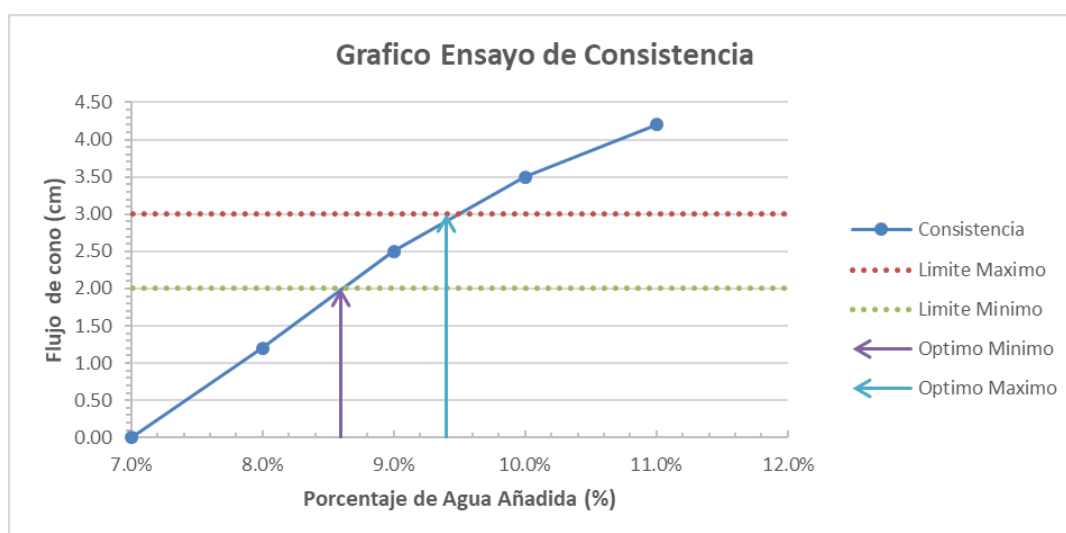


Ilustración 63. Gráfica del ensayo de consistencia para diferentes porcentajes de agua añadida.

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede evidenciar en los resultados para diferentes porcentajes de agua añadido a la mezcla se tiene que el porcentaje óptimo de agua óptimo es de 9.0 % que da como resultado una consistencia de 2.5 cm lo cual se encuentra dentro del rango considerado óptimo según la norma ISSA TB-106 (2012). Este valor confirma que la dosificación de agua utilizada permite una fluidez adecuada de la mezcla, favoreciendo su trabajabilidad y garantizando una aplicación uniforme sobre la superficie, sin riesgos de segregación ni dificultades de extensión.

4.7.2.5 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

Se realizaron las primeras pruebas con el porcentaje teórico calculado y variando el porcentaje de agua en la mezcla, sin embargo se observó exceso de emulsión en la mezcla y también se pudo apreciar que con esta emulsión se tiene un tiempo de ruptura más acelerado, lo cual no da un tiempo adecuado para una mezcla uniforme, por tal motivo se ha incorporado a la mezcla solución de sulfato de aluminio, el cual es un componente que actúa como retardante, por ende se tiene mejor trabajabilidad y se alargó el tiempo de ruptura en la mezcla.

De las pruebas realizadas en el laboratorio se obtuvo buenos resultados con 11.3% de emulsión CQS-1H-P(QK) y solución de sulfato de aluminio al 2% en el agua, por lo que se realizó los ensayos de consistencia con estos criterios de dosificación en la emulsión y se fue variando el porcentaje del agua hasta obtener una buena consistencia en la mezcla.



Ilustración 64. Ensayo de consistencia para diferentes porcentajes de agua añadida a) 8% Agua añadida b) 10% Agua añadida c) 11 % Agua añadida

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 41. Resultados del ensayo de contenido de humedad óptima con emulsión CQS-1H-P(QK) y agregado de la cantera San José – Tenguel.

Agregado	Cemento	Agua + 2% Sulfato de Aluminio	Emulsión CQS-1H-P(QK)	Consistencia (cm)				
100%	400	1.0%	4.00	8.0%	32.00	11.3%	45.2	0.70
100%	400	1.0%	4.00	9.0%	36.00	11.3%	45.2	1.00
100%	400	1.0%	4.00	10.0%	40.00	11.3%	45.2	2.60
100%	400	1.0%	4.00	11.0%	44.00	11.3%	45.2	3.80
100%	400	1.0%	4.00	12.0%	48.00	11.3%	45.2	4.00

Fuente: Elaboración Propia

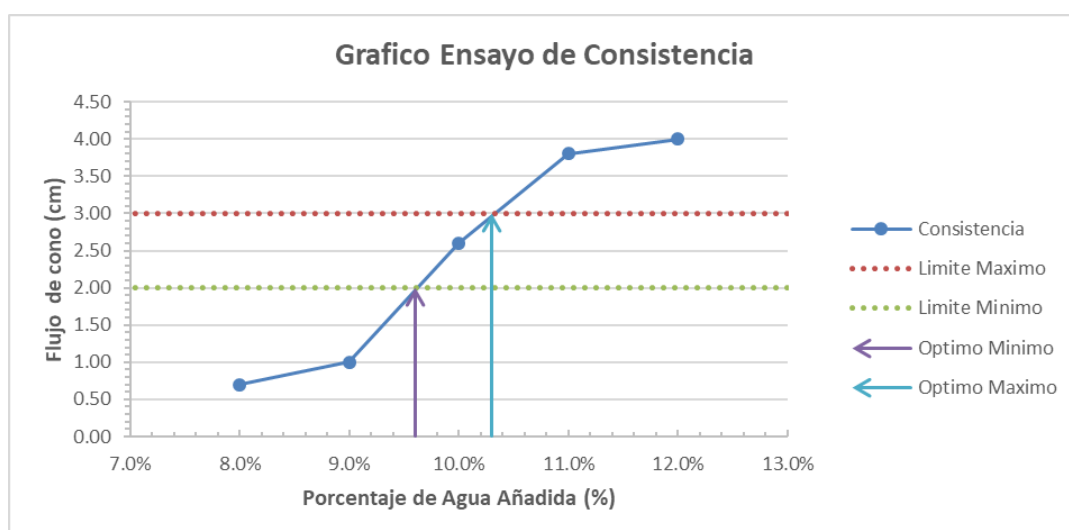


Ilustración 65. Gráfica del ensayo de consistencia para diferentes porcentajes de agua añadida.

Fuente: Elaboración Propia

4.7.3 Tiempo de mezcla. Norma ISSA TB- 113

4.7.3.1 Descripción

La norma ISSA TB-113 (2012) describe un método para determinar el tiempo de mezclado del micropavimento o slurry seal donde intervienen los diferentes componentes de la mezcla. Este tiempo es conocido como tiempo de mezclado útil, este procedimiento tiene como finalidad analizar la interacción entre los materiales

que conforman la mezcla y comprobar que mantenga sus condiciones de manejabilidad durante el tiempo previo al inicio del fraguado. La prueba es esencial para asegurar que, una vez en obra, la mezcla pueda ser colocada sin inconvenientes.

4.7.3.2 Equipos

- Recipientes para mezclado
- Utensillo para el mezclado
- Balanza con capacidad para 500 gramos con precisión de 0.1 gramo
- Cronometro
- Agregado
- Emulsión asfáltica CQS- 1H-P
- Agua potable
- Relleno mineral

4.7.3.3 Ejecución

Para su ejecución, se prepara una muestra con 100 gramos de agregado seco, al que se incorporan, en orden y según su proporción de acuerdo al peso del agregado, el relleno mineral, agua, y finalmente la emulsión asfáltica.



Ilustración 66. Mezcla de los diferentes componentes de la mezcla de micropavimento.

Fuente: Elaboración Propia

Cada componente se integra mediante mezclado a una velocidad constante de 60 a 70 revoluciones por minuto. Tras la adición de la emulsión, se activa el cronómetro y se mezcla por un periodo de 30 segundos. Luego, se deposita aproximadamente la mitad de la mezcla sobre una superficie plana, extendiéndola cuidadosamente hasta formar una capa uniforme con un espesor comprendido entre 6.4 mm y 10 mm.



Ilustración 67. Registro del tiempo de rotura de la mezcla de micropavimento.

Fuente: Elaboración Propia

El resto de la mezcla se mantiene en agitación durante un tiempo máximo de cinco minutos o hasta que se detecten signos evidentes de endurecimiento o pérdida de trabajabilidad. Se registra el tiempo exacto en el que se pierde la capacidad de mezclado y la hora en la que se colocó la muestra.

4.7.3.4 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

Tabla 42. Resultados del ensayo de tiempo de mezcla con emulsión CQS-1H-P y agregado de la cantera San José – Tenguel.

Agregado	Filler	Agua	Emulsión CQS-1H-P	Mezcla (Seg)	Rotura (Seg)	Observación
100.0%	0.0%	11.0%	10.8%	> 300	> 300	La mezcla es muy fluida, se debe disminuir la cantidad de agua.
100.0%	0.0%	10.0%	10.8%	> 300	> 300	La mezcla es muy fluida, se debe

						disminuir la cantidad de agua.
100.0%	0.0%	9.0%	10.8%	> 300	> 300	La mezcla es muy fluida, se debe disminuir la cantidad de agua.
100.0%	0.0%	8.0%	10.8%	164	195	La mezcla no es muy homogénea y existe dificultad para el mezclado.
100.0%	0.5%	9.0%	10.8%	201	268	La mezcla rompe a los 201 segundos, hay que incrementar filler.
100.0%	1.0%	9.0%	10.8%	185	245	La mezcla rompe a los 201 segundos, hay que incrementar filler.
100.0%	1.1%	9.0%	10.8%	194	223	La mezcla es homogénea y uniforme.

Fuente: Elaboración Propia

Para lograr una mezcla homogénea y trabajable, utilizando emulsión de curado controlado tipo CQS-1H-P, fue necesario humedecer al material con el 9.00% de agua. Obteniendo una mezcla trabajable que logra una rotura a los 223 segundos de mezclado, con esto se logró dar cumplimiento a lo especificado en la norma ISSA A143 (2010) en cuanto el tiempo de mezcla donde se especifica hasta 120 segundos mínimo.

4.7.3.5 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

Tabla 43. Ensayo de tiempo de mezcla con emulsión CQS-1H-P(QK) y agregado de la cantera San José – Tenguel.

Agregado	Filler	Agua	Emulsión CQS-1H-P(QK)	Agua + SA al 2%	Mezcla (Seg)	Rotura (Seg)	Observación
100.0%	0.0%	14.0%	11.30%	0.00%	>300	>300	La mezcla es muy fluida, se debe disminuir la cantidad de agua

100.0%	0.0%	12.0%	11.30%	0.00%	>300	>300	La mezcla es muy fluida, se debe disminuir la cantidad de agua
100.0%	0.0%	10.0%	11.30%	0.00%	>300	>300	La mezcla es poco trabajable, pero no rompe pasado los 300 segundos
100.0%	0.5%	10.0%	11.30%	0.00%	33	45	La mezcla rompe prematuramente, rompe a los 45 segundos
100.0%	0.5%	0.0%	11.30%	10.00%	292	325	La mezcla es homogénea y uniforme, rompe a los 325 segundos
100.0%	1.0%	0.0%	11.30%	10.00%	181	190	La mezcla es homogénea y uniforme, rompe a los 190 segundos
100.0%	1.0%	0.0%	11.30%	8.00%	84	92	La mezcla rompe prematuramente, rompe a los 92 segundos

Fuente: Elaboración Propia

Para lograr una mezcla homogénea y trabajable, utilizando emulsión de curado controlado tipo CQS-1H-P(QK), fue necesario humedecer al material con el 10.00% de agua con 2% de sulfato de aluminio. Obteniendo una mezcla trabajable que logra una rotura a los 190 segundos de mezclado, con esto se logró dar cumplimiento a lo especificado en la norma ISSA A143 (2010) en cuanto el tiempo de mezcla donde se especifica hasta 120 segundos mínimo.

4.7.4 Ensayo de cohesión. Norma ISSA TB- 139

4.7.4.1 Descripción

Este método de ensayo se utiliza para determinar el desarrollo inicial del fraguado y curado de sistemas de superficies de tipo slurry y micropavimento como una función de torque a través del tiempo (ISSA TB- 139, 2012)

La cohesión en la mezcla asegura que el micropavimento resista el tránsito en el tiempo determinado para su apertura, evitando fallas prematuras como desprendimientos o pérdida de material. Este ensayo permite optimizar el diseño ajustando las proporciones de los componentes hasta lograr una respuesta estructural estable. El resultado obtenido es clave para establecer el tiempo mínimo requerido antes de habilitar la vía al tránsito, lo cual influye directamente en la efectividad y vida útil del tratamiento aplicado.

4.7.4.2 Equipos

- Torsiómetro
- Anillos metálicos con dimensiones de: 65.5 ± 0.5 mm de diámetro exterior; 60.0 ± 0.5 mm de diámetro interior; altura de 6.0 ± 0.5 mm ó 10.0 ± 0.5 mm.
- Balanza con capacidad para 500 gramos con precisión de 0.1 gramo.
- Papel de lija de grano 220
- Espátula
- Recipientes
- Cronometro
- Filtro de 6.8 kg (15 lb)
- Agregado
- Emulsión asfáltica CQS-1H-P
- Agua

4.7.4.3 Ejecución

Para llevar a cabo el ensayo, se posiciona el molde anular sobre una lámina de fieltro impermeable, sirviendo como base de soporte. Previamente, se prepara la mezcla de micropavimento con los componentes dosificados. Se coloca la mezcla en el molde, nivelando su superficie para obtener una capa plana y uniforme. Es importante tener en cuenta que el tamaño del molde anular empleado en el ensayo depende del tipo de gradación del agregado utilizado en la mezcla. Para mezclas clasificadas como Tipo II, se utiliza un anillo de 6 mm de altura, mientras que para gradaciones Tipo III, se requiere un molde de 10 mm.



Ilustración 68. Colocación de mezcla de micropavimento en los moldes.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que la muestra ha adquirido suficiente rigidez para mantener su forma sin fluir, se retira cuidadosamente el molde anular. El ensayo se lleva a cabo en intervalos regulares de 15 o 30 minutos después de haber vertido la mezcla en el molde.

Se ajusta la presión de trabajo del aire a 200 kPa del equipo y se verifica que el pie de contacto, recubierto con neopreno, esté limpio y en condiciones para el ensayo. El instrumento de medición de torque se calibra a cero antes del contacto con la muestra.

La muestra se alinea correctamente bajo el pie de neopreno, mientras que el soporte base se estabiliza manualmente. El pie se baja con una velocidad constante de entre 8 y 10 cm por segundo hasta entrar en contacto con la superficie de la muestra.



Ilustración 69. Colocación de las probetas en el equipo para el ensayo.

Fuente: Elaboración Propia

Tras un periodo de contacto de 5 a 6 segundos, se aplica un movimiento de giro mediante el torsiómetro, generando un desplazamiento angular entre 90 y 120 grados en un intervalo de tiempo de 0.5 a 0.7 segundos.



Ilustración 70. Ensayo mediante giro en el torsiómetro.

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, se registra el valor máximo de torque alcanzado y se describe el tipo de falla observada en la mezcla, lo cual permite evaluar la evolución de su resistencia a corte en función del tiempo de fraguado.



Ilustración 71. Registro del valor de torque alcanzado.

Fuente: Elaboración Propia

4.7.4.4 Resultado Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

Tabla 44. *Fórmula de trabajo utilizada para el ensayo de cohesión.*

Material	Porcentaje
Agregado cantera San Jose	100.00%
Relleno mineral	1.10%
Agua Potable	9.00%
Emulsión CQS-1H-P	10.80%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 45. *Resultados de cohesión de la mezcla de micropavimento.*

Tiempo	Torque
30 minutos	13 kg-cm
60 minutos	17 kg - cm
90 minutos	21 kg - cm
120 minutos	26 kg - cm
180 minutos	32 kg - cm

Fuente: Elaboración Propia

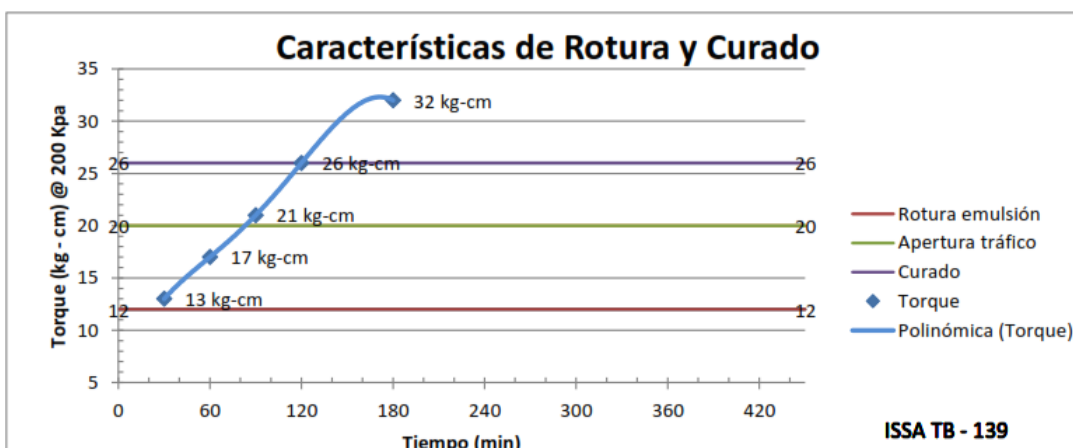


Ilustración 72. Gráfica del ensayo de cohesión de la mezcla de micropavimento.

Fuente: Elaboración Propia

Se alcanza 13 kg-cm a los 30 minutos, cumpliendo con el requisito mínimo para fraguado especificado en la norma ISSA A143 (2010) donde el mínimo es 12 kg- cm. A los 60 minutos, se registraron 17 kg- cm, valor que está ligeramente por debajo de lo especificado en la norma ISSA A143 (2010) donde se indica 20 kg – cm. No obstante, el torque continúa incrementando y alcanza 21 kg – cm a los 90 minutos, valor que se considera aceptable si se aplica el criterio de espín cercano especificado en la norma ISSA TB-139 (2012), dado que ocurre poco antes del pico del torque.

El valor máximo de cohesión que se obtuvo fue de 32 kg-cm a los 180 minutos lo que indica un curado completo de la mezcla y posible apertura al tráfico.

4.7.4.5 Resultado Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

Tabla 46. Fórmula de trabajo utilizada para el ensayo de cohesión.

Material	Porcentaje
Agregado cantera San José	100.00%
Relleno mineral	1.00%
Agua Potable + 2% Sulfato de aluminio	10.00%
Emulsión CQS-1H-P	11.30%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 47. Resultados de cohesión de la mezcla de micropavimento.

Tiempo	Torque
30 minutos	15 kg-cm
60 minutos	18 kg – cm
90 minutos	21 kg – cm
120 minutos	25 kg – cm
180 minutos	27 kg – cm
240 minutos	29 kg – cm

Fuente: Elaboración Propia

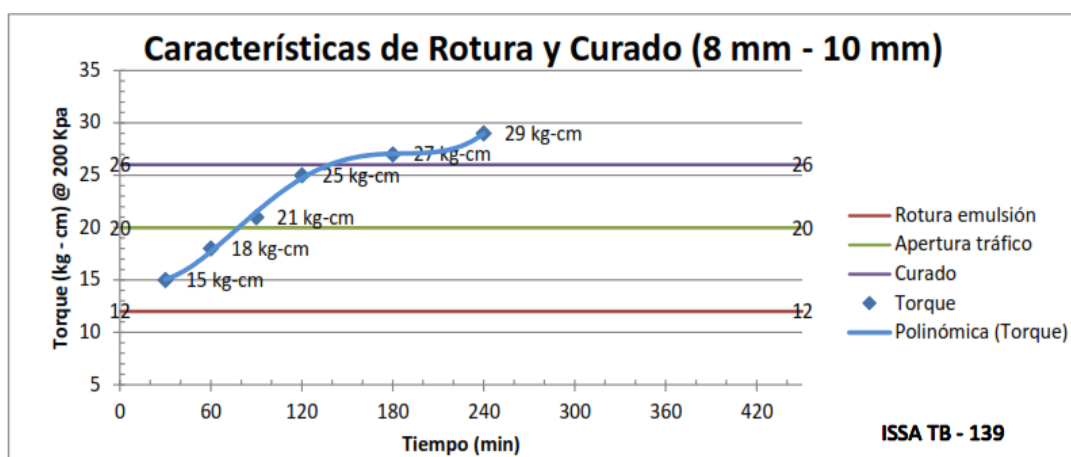


Ilustración 73. Gráfica del ensayo de cohesión de la mezcla de micropavimento.

Fuente: Elaboración Propia

Se alcanza 15 kg-cm a los 30 minutos, cumpliendo con el requisito mínimo para fraguado especificado en la norma ISSA A143 (2010) donde el mínimo es 12 kg- cm. A los 60 minutos, se registraron 18 kg- cm, valor que está ligeramente por debajo de lo especificado en la norma ISSA A143 (2010) donde se indica 20 kg – cm. No obstante, el torque continúa incrementando y alcanza 21 kg – cm a los 90 minutos, valor que se considera aceptable si se aplica el criterio de espín cercano especificado en la norma ISSA TB-139 (2012), dado que ocurre poco antes del pico del torque.

El valor máximo de cohesión que se obtuvo fue de 29 kg-cm a los 240 minutos lo que indica un curado completo de la mezcla y posible apertura al tráfico.

4.7.5 Ensayo de abrasión en húmedo. Norma ISSA TB- 100

4.7.5.1 Descripción

La norma ISSA TB-100 (2012) contempla un ensayo destinado a medir la capacidad de una mezcla de micropavimento para resistir la acción del desgaste cuando se encuentra sometida a condiciones de fricción combinadas con la presencia de humedad.

La implementación de este ensayo permite verificar si la mezcla tiene la cohesión y estabilidad necesarias para resistir el tráfico vehicular inicial y las condiciones ambientales sin sufrir desprendimientos prematuros.

4.7.5.2 Equipos

- Balanza con capacidad para 5.000 gramos con precisión de 0.1 gramo
- Recipiente de mezcla
- Herramienta de aplicación (espátula)
- Superficie o placa de ensayo
- Dispositivo de abrasión húmeda
- Termómetro de control
- Temporizador o reloj de medición
- Horno a 60°C (140°F) $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($5,4^{\circ}\text{F}$)
- Baño agua a 25°C (77°F) $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (1.8°F)

4.7.5.3 Ejecución

Se prepara una muestra utilizando aproximadamente 700 gramos de agregado. La mezcla final se realiza según los parámetros establecidos previamente y se homogeniza durante 30 segundos.



Ilustración 74. Preparación de la mezcla de micropavimento para el ensayo.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez lista, se coloca dentro del molde de ensayo se debe asegurar una distribución uniforme.



Ilustración 75. Colocación de la muestra de micropavimento en el molde.

Fuente: Elaboración Propia

La muestra se coloca en el horno a 60 °C por un tiempo controlado de entre 15 y 30 horas.



Ilustración 76. Colocación de la probeta en el horno.

Fuente: Elaboración Propia

Luego del proceso de secado en horno, la muestra se extrae y se deja enfriar a temperatura ambiente. Una vez estabilizada térmicamente, se procede a registrar su peso inicial. A continuación, se sumerge en agua a 25 °C durante una hora.

Transcurrido este tiempo, se monta en el dispositivo de abrasión, asegurando su fijación y manteniéndola completamente sumergida durante cinco minutos tiempo que dura el ensayo.



Ilustración 77. Colocación de la probeta en el dispositivo de abrasión.

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se retira la muestra del equipo y se coloca en el horno para posterior volver a pesar. La diferencia entre ambos pesos representa la pérdida por abrasión.

Este ensayo se aplica también se debe aplicar inmersión prolongada de seis días. En este caso, la muestra debe permanecer sumergida en agua a 25 °C durante dicho periodo, y la prueba debe iniciarse dentro de las dos horas posteriores a la finalización del tiempo de remojo. El procedimiento de ensayo se mantiene igual al descrito para una hora de inmersión, permitiendo comparar el comportamiento de la mezcla en condiciones de exposición extendida al agua.

4.7.5.4 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

A fin de obtener el valor final de abrasión por unidad de área, se multiplica la cantidad de material desprendido expresada en gramos por un coeficiente específico que depende del equipo utilizado de acuerdo a la **Tabla 48**. En este caso, el ensayo se realiza con un equipo que requiere aplicar un factor de corrección de 32.9 g/m².

Tabla 48. Factores de corrección de pérdida para la correlación con C-100.

Modelo Hobart	Duración Equivalente de Ensayo (segundos)	Multiplique la pérdida de gramos por el factor adecuado para obtener la pérdida por área unitaria	
		g / ft ²	g / m ²
C-100 (1)	300 ± 2	3.06 x 1.0	32.9 x 1.0
A-120 (1)	405 ± 2	2.78 x 1.17	29.9 x 1.17
N-50 (1)	315 ± 2	3.48 x 0,78	37.5 x 0.78
N-50 Modificada (2)	315 ± 2	3.06 x 1.0	32.9 x 1.0

Fuente:(ISSA 100, 2012)

Tabla 49. Resultados del ensayo de abrasión en húmedo (1 hora).

Agregado	Filler	Agua	Emulsión CQS-1H-P	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Abrasión (gr)	Factor	Pérdida Abrasión (gr/m ²)
100.0%	1.1%	9.0%	8.00%	1650.28	1634.35	15.93	32.9	524.10
100.0%	1.1%	9.0%	10.00%	1678.24	1663.09	15.15	32.9	498.44
100.0%	1.1%	9.0%	12.00%	1660.61	1654.06	6.55	32.9	215.49
100.0%	1.1%	9.0%	14.00%	1688.38	1685.57	2.81	32.9	92.45

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 50. Resultados del ensayo de abrasión en húmedo (6 días).

Agregado	Filler	Agua	Emulsión CQS-1H-P	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Abrasión (gr)	Factor	Pérdida Abrasión (gr/m ²)
100.0%	1.1%	9.0%	8.00%	1676.98	1648.83	28.15	32.9	926.14
100.0%	1.1%	9.0%	10.00%	1665.47	1650.98	14.49	32.9	476.72
100.0%	1.1%	9.0%	12.00%	1638.42	1631.68	6.74	32.9	221.75
100.0%	1.1%	9.0%	14.00%	1655.17	1652.94	2.23	32.9	73.37

Fuente: Elaboración Propia

La norma ISSA A143 (2010) nos indica los límites permisibles para este ensayo siendo así que la abrasión húmeda a 1 hora el valor máximo es 538 g/m² y a los 6 días máximo 807 g/m².

Los resultados obtenidos indican que el rango adecuado de contenido de emulsión para la mezcla de micropavimento se encuentra entre el 10 % y el 14 %, ya que sus formulaciones presentan excelente resistencia a corto plazo y largo plazo frente al desgaste por abrasión en condiciones de humedad cumpliendo así los parámetros indicados en la norma; sin embargo, es importante evaluar el contenido máximo de emulsión para evitar la exudación a la hora de colocar en obra.

4.7.5.5 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

Tabla 51. Resultados del ensayo de abrasión en húmedo (1 hora).

Agregado	Filler	Agua + 2% SA	Emulsión CQS-1H-P(QK)	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Abrasión (gr)	Factor	Pérdida Abrasión (gr/m ²)
100.0%	1.0%	10.0%	8.00%	1647.5	1622.16	25.34	32.90	833.69
100.0%	1.0%	10.0%	10.00%	1655.89	1646.24	9.65	32.90	317.49
100.0%	1.0%	10.0%	12.00%	1675.5	1668.34	7.16	32.90	235.56
100.0%	1.0%	10.0%	14.00%	1657.31	1653.41	3.90	32.90	128.31

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 52. Resultados del ensayo de abrasión en húmedo (6 días).

Agregado	Filler	Agua + 2% SA	Emulsión CQS-1H-P(QK)	P. Inicial (gr)	P. Final (gr)	Abrasión (gr)	Factor	Pérdida Abrasión (gr/m ²)
100.0%	1.0%	10.0%	8.00%	1638.97	1605.45	33.52	32.90	1102.81
100.0%	1.0%	10.0%	10.00%	1658.81	1642.23	16.58	32.90	545.48
100.0%	1.0%	10.0%	12.00%	1654.73	1645.97	8.76	32.90	288.20
100.0%	1.0%	10.0%	14.00%	1672.51	1664.70	7.81	32.90	256.95

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos indican que el rango adecuado de contenido de emulsión para la mezcla de micropavimento se encuentra entre el 10 % y el 14 % para que se dé cumplimiento a lo que se indica en la norma ISSA A143 (2010).

4.7.6 Ensayo de rueda de carga. Norma ISSA TB- 109

4.7.6.1 Descripción

Este método se utiliza para determinar el contenido máximo de asfalto en sistemas de pavimentación con lechada mediante un probador de rueda cargada. Un exceso de asfalto puede provocar un lavado o densificación grave del asfalto bajo cargas de tráfico elevadas (ISSA TB-109, 2018).

Este ensayo es importante para evitar fallas prematuras por exudación o desprendimiento del ligante asfáltico, especialmente en zonas sometidas a cargas de tráfico altas. Un contenido excesivo de asfalto puede generar corrimiento de la mezcla y pérdida de la textura superficial.

4.7.6.2 Equipos

- Equipo de ruedas de carga
- Caja de presas
- Rueda de goma suave
- Placas de montaje de muestras
- Marco de arena de acero
- Balanza de capacidad 2000g con una precisión de 0,1 g
- Recipiente
- Espátula
- Horno
- Arena fina de Ottawa, graduada entre tamices de 600 μm (N° 30) y 150 μm (N°100)

4.7.6.3 Ejecución

El proceso comienza con la elaboración de la mezcla de micropavimento, integrando sus componentes según las proporciones previamente definidas, se coloca dentro del molde de ensayo y se nivela hasta lograr una superficie uniforme.



Ilustración 78. Preparación de la mezcla de micropavimento.

Fuente: Elaboración Propia



Ilustración 79. Colocación de la mezcla de micropavimento en el molde.

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente, la muestra se coloca en el horno, manteniéndola a 60 °C durante un periodo comprendido entre 15 y 30 horas.



Ilustración 80. Colocación de la probeta en el horno.

Fuente: Elaboración Propia

Luego se posiciona sobre la muestra la rueda de carga y se carga la caja de pesas hasta la carga de 125 libras. El contador del equipo se ajusta a cero, y se inicia la aplicación cíclica de carga sobre la superficie de la mezcla. Una vez alcanzados los 1000 ciclos de carga, el equipo se detiene automáticamente. En ese momento, se retiran las partículas sueltas de la superficie y se pesa la muestra.



Ilustración 81. Colocación de la rueda de carga sobre la probeta.

Fuente: Elaboración Propia

Se prepara una masa de 200 gramos de arena, previamente calentada a una temperatura de 80 °C. Esta arena se distribuye de manera uniforme dentro del marco de aplicación y se recubre con una tira metálica niveladora.

Se coloca la rueda de carga nuevamente sobre la mezcla con arena durante 100 ciclos.

Finalmente se elimina el exceso de arena acumulada sobre la superficie de la muestra y se realiza un nuevo pesaje para registrar la pérdida de masa total.

4.7.6.4 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

La variación entre los valores medidos antes y después del ensayo refleja la sensibilidad de la mezcla frente al movimiento del ligante. Esta información es clave para definir el contenido máximo de asfalto que puede incorporarse sin comprometer la estabilidad del micropavimento cuando está sometido a cargas de tráfico.

Tabla 53. Resultados del ensayo de rueda de carga.

Agregado	Filler	Agua	Emulsión CQS-1H- P	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Rueda Carga (gr)	Área Molde (m ²)	Adhesión Arena (gr/m ²)
100.0%	1.1%	9.0%	8.00%	907.74	909.75	2.01	0.012425	161.77
100.0%	1.1%	9.0%	10.00%	908.47	912.45	3.98	0.012425	320.32
100.0%	1.1%	9.0%	12.00%	895.95	901.46	5.51	0.012425	443.46
100.0%	1.1%	9.0%	14.00%	876.99	886.6	9.61	0.012425	773.44

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados determinan que el contenido de emulsión óptimo está en el rango del 8% al 12% de emulsión asfáltica, ya que este rango cumple de acuerdo a lo especificado en la norma ISSA A143 (2010) , donde indica como valor máximo 538 gr/m². De los resultados también se puede apreciar que para valores que superen el 14% de emulsión se tendrán problemas en el comportamiento de la mezcla haciéndola más vulnerable a desprendimientos prematuros por el paso del tráfico o a su vez corrimientos en la superficie.

4.7.6.5 Resultados Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

Tabla 54. Resultados del ensayo de rueda de carga.

Agregado	Filler	Agua + 2% SA	Emulsión CQS-1H- P(QK)	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Rueda Carga (gr)	Área Molde (m ²)	Adhesión Arena (gr/m ²)
100.0%	1.0%	10.0%	8.00%	918.15	919.88	1.73	0.012425	139.24
100.0%	1.0%	10.0%	10.00%	944.99	948.25	3.26	0.012425	262.37
100.0%	1.0%	10.0%	12.00%	903.6	908.89	5.29	0.012425	425.75
100.0%	1.0%	10.0%	14.00%	907.07	915.25	8.18	0.012425	658.35

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados determinan que el contenido de emulsión óptimo está en el rango del 8% al 12% de emulsión asfáltica, pues en esos rangos de porcentaje de emulsión

asfáltica se tienen valores de adhesión de arena menores a 538 gr/m² y se cumple de acuerdo a lo especificado en la norma ISSA A143 (2010).

4.8 Determinación del porcentaje óptimo de emulsión

Para el cálculo del porcentaje óptimo de emulsión se han seguido los parámetros correspondientes a la norma ISSA TB-111 (2005), donde se indica que una vez se tenga los valores del ensayo de abrasión en húmedo y de rueda de carga de la mezcla de micropavimento, para obtener el valor óptimo de emulsión se deben dibujar los gráficos de los ensayos como se muestra en la **Ilustración 82** y la superposición de estas dos curvas es el valor óptimo de emulsión asfáltica.

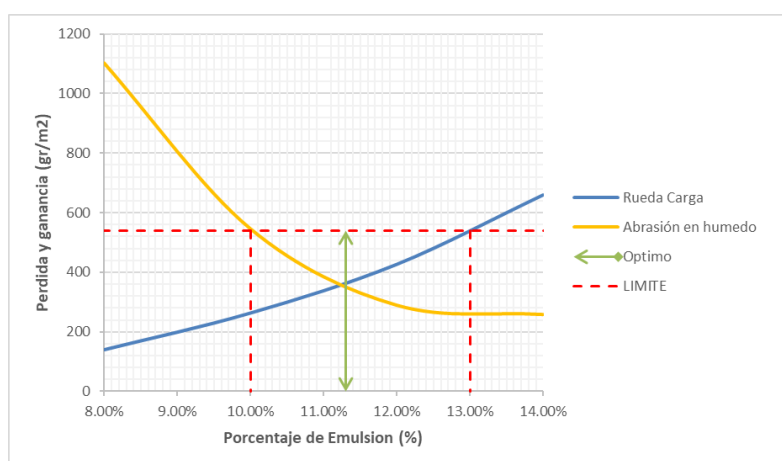


Ilustración 82. Determinación de la gráfica para obtener el contenido óptimo de asfalto en la mezcla de micropavimento.

Fuente: ISSA TB-111 (2005)

4.8.1 Porcentaje óptimo Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

Tabla 55. Datos para obtener el porcentaje óptimo de emulsión CQS-1H-P.

Agregado	Filler	Agua	Emulsión	Rueda De Carga (gr/m ²)	Abrasión en húmedo (gr/m ²)
100.0%	1.1%	9.0%	8.00%	161.77	926.14
100.0%	1.1%	9.0%	10.00%	320.32	476.72
100.0%	1.1%	9.0%	12.00%	443.46	221.75
100.0%	1.1%	9.0%	14.00%	773.44	73.37

Fuente: Elaboración Propia

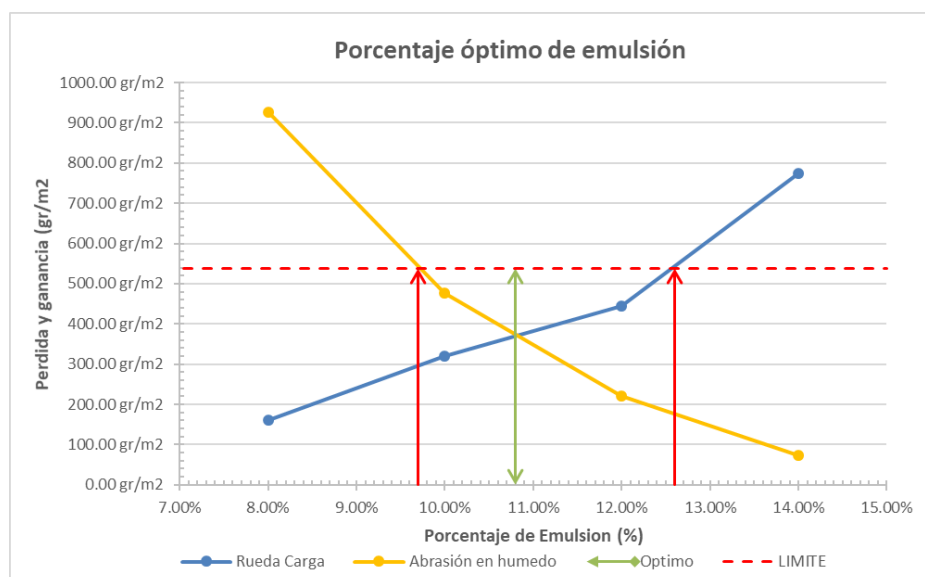


Ilustración 83. Gráfico para obtener el porcentaje óptimo de emulsión CQS-1H-P.

Fuente: Elaboración Propia

A partir del análisis gráfico de los resultados obtenidos en los ensayos de abrasión en húmedo y rueda cargada, se identificó el punto de intersección de ambas curvas, lo que permitió determinar un contenido óptimo de emulsión asfáltica del 10.80 % \pm 0.5 %.

Es importante destacar que al superar el 12.60 % de emulsión, se observan signos evidentes de exudación en la mezcla, lo que compromete su desempeño superficial. Por otro lado, al utilizar proporciones por debajo del 9.70 %, la mezcla presenta desprendimientos severos, indicando una pérdida de cohesión crítica.

4.8.2 Porcentaje óptimo Agregado Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

Tabla 56. Datos para obtener el porcentaje óptimo de emulsión CQS-1H-P(QK).

Agregado	Filler	Agua + 2% SA	Emulsión CQS-1H-P(QK)	Rueda De Carga (gr/m ²)	Abrasión en húmedo (gr/m ²)
100.0%	1.0%	10.0%	8.00%	139.24	1102.81
100.0%	1.0%	10.0%	10.00%	262.37	545.48
100.0%	1.0%	10.0%	12.00%	425.75	288.2
100.0%	1.0%	10.0%	14.00%	658.35	256.95

Fuente: Elaboración Propia

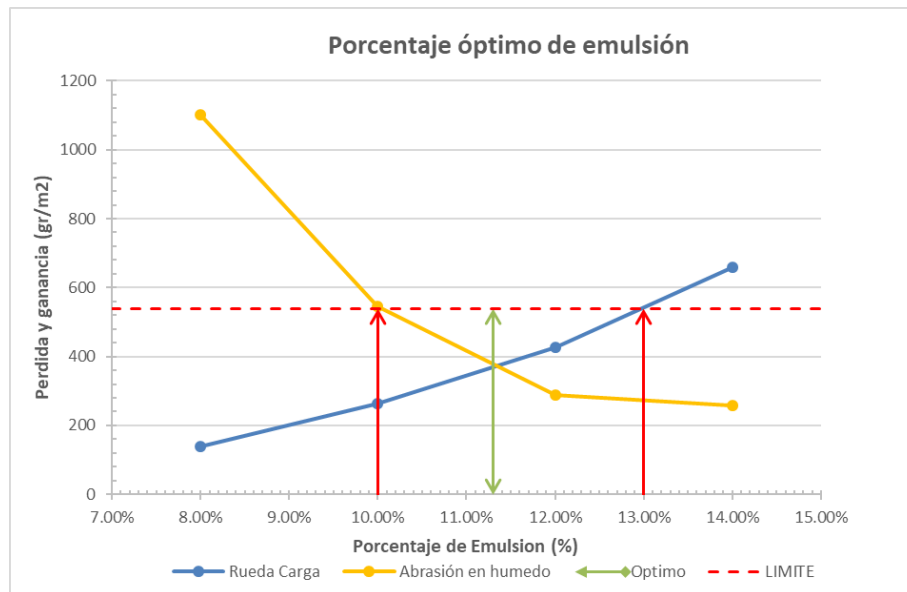


Ilustración 84. Gráfico para obtener el porcentaje óptimo de emulsión CQS-1H-P(QK).

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con los resultados obtenidos se determina un contenido óptimo de emulsión asfáltica del 11.30 % \pm 0.5 %.

Es importante destacar que al superar el 13.00 % de emulsión, se observan signos evidentes de exudación en la mezcla, lo que compromete su desempeño superficial. Por otro lado, al utilizar proporciones por debajo del 10.00 %, la mezcla presenta desprendimientos severos, indicando una pérdida de cohesión crítica.

5. Resultados y discusión

5.1 Caracterización de los agregados

Se ha realizado ensayos de caracterización del agregado de cuatro minas ubicadas en el cantón Guayaquil de acuerdo a normas vigentes ASTM, AASHTO e ISSA, donde se estable todos los parámetros y especificaciones para la ejecución e interpretación de los resultados.

Tabla 57. Resumen de la caracterización de los agregados pétreos parte 1.

ASTM	AASHTO	ISSA	Ensayo de agregado	Unidad	Mínimo	Máximo	ROOKAAZUL	Cumple	VERDU	Cumple	TECHBUILDRES
C-136	T 27		Granulometría				No definido	No	No definido	No	Tipo III
D-4318			Índice de plasticidad		NP		NP	Si	NP	Si	NP
C-88	T- 104		Resistencia de Sulfatos de Sodio o Sulfato de Magnesio	%	15%	6.06%	6.06%	Si	5.67%	Si	5.69%
C- 131	T-96		Abrasión (Maquina de los ángeles)	%		30%	19.80%	Si	20.03%	Si	19.95%
		TB - 145	Azul de metileno	mg/g		12	10	Si	10	Si	5
D- 2419	T - 176		Equivalente de Arena	%	65%		43.60%	No	50.95%	No	54.69%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 58. Resumen de la caracterización de los agregados pétreos parte 2.

ASTM	AASHTO	ISSA	Ensayo de agregado	Unidad	Mínimo	Máximo	SAN JOSE - Vía a la Costa	Cumple	SAN JOSE - Tenguel	Cumple
C-136	T 27		Granulometría				No definido	No	Tipo III	Si
D-4318			Índice de plasticidad		NP		NP	Si	NP	Si
C-88	T- 104		Resistencia de Sulfatos de Sodio o Sulfato de Magnesio	%	15%		5.24%	Si	4.23%	Si

C- 131	T-96	Abrasión (Maquina de los ángeles)	%	30%	20.49%	Si	16.95%	Si
	TB -145	Azul de metileno	mg/g	12	5	Si	4	Si
D- 2419	T - 176	Equivalente de Arena	%	65%	53.78%	No	66.17%	Si

Fuente: Elaboración Propia

Las **Tabla 57** y **Tabla 58** muestran el resumen de los resultados obtenidos de los agregados de las cinco canteras analizadas.

La granulometría en la mina Rookaazul, Verdú y San José – Vía a la costa no se encuentra definida, pues no están dentro de los límites granulométricos para agregados Tipo II ni III para micropavimento; mientras que las canteras Techbuildres y San José - Tenguel se ajustan dentro de un micropavimento tipo III.

Los resultados del índice de plasticidad nos indican que todas las canteras presentan valores de plasticidad cero, lo que indica que el material es adecuado para el uso en micropavimento, ya que este es un indicador que garantiza mayor estabilidad y durabilidad en la mezcla.

De acuerdo a los resultados del ensayo a los sulfatos los agregados de las cinco minas presentan valores inferiores al máximo exigido, por tal motivo estos materiales no son propensos a desintegración por acción de sulfatos, por lo tanto, son aptos para el uso en mezclas asfálticas.

Según lo establecido en la norma ISSA A143 (2010), para que un agregado sea considerado apto en aplicaciones de micropavimento, debe presentar una pérdida por abrasión inferior al 30 % en el ensayo realizado con la máquina de Los Ángeles. Todos los agregados analizados presentan valores inferiores al máximo especificado.

Para los agregados de las canteras Rookaazul y Verdú se obtuvo valores de 10 mg/g en el ensayo de azul de metileno, mientras que para la mina Techbuildres, San José – vía a la costa y San José - Tenguel se obtuvo 5 mg/g, 5 mg/g y 4 mg/g respectivamente; lo que nos indica que están por debajo del valor máximo especificado para el uso en mezclas asfálticas.

El ensayo de equivalente de arena es un criterio fundamental en la caracterización de agregados finos destinados a mezclas de micropavimento, ya que permite evaluar su grado de limpieza y la proporción de material arcilloso presente. La norma ISSA A143 (2010) establece como requisito mínimo un valor de 65 % para considerar el agregado apto. El material proveniente de la cantera San José - Tenguel es el único que cumple con la especificación, con un valor de 66.17 %. Los agregados de las demás fuentes presentan resultados por debajo del límite especificado, lo que indica una calidad insuficiente para su empleo en mezclas de micropavimento, debido a la posible afectación en la estabilidad y desempeño del sistema.

De las cinco canteras la única que cumple con todos los parámetros especificados en la norma de rendimiento recomendada para micropavimentación ISSA A143 (2010), es la cantera San José - Tenguel, por tal motivo se seleccionó este agregado para la evaluación de la mezcla de micropavimento.

5.2 Caracterización de la emulsión asfáltica

Tabla 59. Resumen de la caracterización de la emulsión asfáltica CQS-1H-P.

ASTM	AASHTO	Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	CQS-1H-P	Cumple
D - 244	T- 59	Porcentaje de asfalto residual	%	62	-	62.02	Si
D -244	T- 59	Estabilidad de asentamiento	%	-	1	0.32	Si
D - 36	T- 53	Reblandecimiento del bitumen	°C	57	-	57.00	Si
D - 5	T - 46	Penetración del material bituminoso	mm	40	90	70.00	Si

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 60. Resumen de la caracterización de la emulsión asfáltica CQS-1H-P(QK).

ASTM	AASHTO	Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	CQS-1H-P	Cumple
D - 244	T- 59	Porcentaje de asfalto residual	%	62	-	62.04	Si
D -244	T- 59	Estabilidad de asentamiento	%	-	1	0.38	Si
D - 36	T- 53	Reblandecimiento del bitumen	°C	57	-	57.00	Si
D - 5	T - 46	Penetración del material bituminoso	mm	40	90	71.00	Si

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en los ensayos para los dos tipos de emulsión asfáltica indican que cumplen con todos los requisitos exigidos por las normas ASTM y AASHTO aplicables. Por tal motivo se considera apta para su uso en tratamientos superficiales como el micropavimento.

5.3 Resumen de formulación para Micropavimento con Agregado de la Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P

Conforme a todos los ensayos y verificación con las especificaciones vigentes se tiene la siguiente formulación a la que se le denominara como formula maestra de micropavimento A que de acuerdo a los ensayos previamente realizados cumple con todos los parámetros de acuerdo a la norma de rendimiento recomendada para la Micropavimentación ISSA A143 (2010). Se ha llegado al diseño final de acuerdo a las dosificaciones presentes en la **Tabla 61**.

Tabla 61. Fórmula maestra A para micropavimento tipo III.

Descripción	Dosificación	Rangos
Agregado Cantera San José - Tenguel	100%	-
Relleno mineral (Cemento Portland Tipo II)	1.10%	
Agua	9.00%	
Emulsión CQS-1H-P (62% Asfalto residual)	10.80%	10.3% - 11.3%

Fuente: Elaboración Propia

La formulación desarrollada para la mezcla de micropavimento fue sometida a ensayos de desempeño, cuyos resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma ISSA A143 (2010), que define los criterios de aceptación para aplicaciones de micropavimentación. El cumplimiento de estos parámetros confirma que la mezcla diseñada presenta las características necesarias para garantizar un comportamiento funcional adecuado en condiciones reales de servicio, asegurando estabilidad, durabilidad y desempeño estructural conforme a los estándares técnicos exigidos.

Tabla 62. Resultado de las pruebas de desempeño de la formula maestra A.

ISSA	Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Mezcla	Cumple
TB 113	Tiempo de mezcla	segundos	120	-	194.00	Si
TB 139	Cohesión 30 min	kg-cm	12	-	13.00	Si
TB 139	Cohesión 60 min	kg-cm	20 o espin cercano	-	17.00	Si
TB 100	Abrasión en húmedo (saturación 1 hora)	gr/m ²	-	538	357.00	Si
TB 100	Abrasión en húmedo (saturación 6 días)	gr/m ²	-	807	381.00	Si
TB 109	Rueda de carga	gr/m ²	-	538	366.00	Si

Fuente: Elaboración Propia

5.4 Resumen de formulación para Micropavimento con Agregado de la Mina San José – Tenguel y Emulsión CQS-1H-P(QK)

El análisis realizado con el agregado de la mina San José- Tenguel y la emulsión CQS-1H-P(QK) dieron como resultado la formulación a la que se le denominará formula maestra B; los resultados de desempeño realizados a la mezcla cumplen con todos los parámetros de especificaciones, dando como resultado la dosificación presente en la **Tabla 63**.

Tabla 63. Fórmula maestra B para micropavimento tipo III.

Descripción	Dosificación	Rangos
Agregado Cantera San José - Tenguel	100%	-
Relleno mineral (Cemento Portland Tipo II)	1.00%	
Agua con 2% Sulfato de Aluminio	10.00%	
Emulsión CQS-1H-P(QK) (62% Asfalto residual)	11.30%	10.8% - 11.8%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 64. Resultado de las pruebas de desempeño de la formula maestra B.

ISSA	Ensayo	Unidad	Mínimo	Máximo	Mezcla	Cumple
TB 113	Tiempo de mezcla	segundos	120	-	190.00	Si
TB 139	Cohesión 30 min	kg-cm	12	-	15.00	Si
TB 139	Cohesión 60 min	kg-cm	20 o espin cercano	-	18.00	Si
TB 100	Abrasión en húmedo (saturación 1 hora)	gr/m ²	-	538	276.00	Si
TB 100	Abrasión en húmedo (saturación 6 días)	gr/m ²	-	807	416.00	Si
TB 109	Rueda de carga	gr/m ²	-	538	344.00	Si

Fuente: Elaboración Propia

6. Conclusiones

Se llevó a cabo el análisis granulométrico de los agregados provenientes de cinco canteras ubicadas en la ciudad de Guayaquil. Los resultados obtenidos muestran que los materiales de las canteras Rookaazul, Verdú y San José – vía a la costa no se ajustan a los rangos definidos por la faja granulométrica para mezclas de micropavimento Tipo II ni Tipo III, según la norma ISSA A143 (2010). En cambio, los agregados de las canteras Techbuildres y San José – Tenguel presentan una distribución granulométrica que se enmarca dentro de los límites establecidos para Tipo III. Cabe señalar que los materiales de las canteras que no cumplen podrían ser optimizados mediante la combinación con otros agregados de distinta granulometría. Esta acción permitiría modificar la distribución de tamaños de partícula y mejorar su compatibilidad con los requisitos técnicos establecidos para mezclas de micropavimento.

Los ensayos correspondientes a índice de plasticidad, resistencia de sulfatos de sodio, azul de metileno y abrasión mediante la máquina de los ángeles de los agregados de las cinco minas presentan características dentro de los rangos especificados en la norma de rendimiento recomendada para micro pavimentación ISSA A143 (2010). Estos valores indican que, en lo que respecta a estas propiedades los materiales cumplen con los criterios requeridos.

Uno de los ensayos fundamentales para la evaluación de la calidad del agregado fino es el equivalente de arena, ya que permite estimar la presencia de finos plásticos o contaminantes en el material. De acuerdo con los resultados obtenidos, únicamente el agregado proveniente de la cantera San José – Tenguel cumple con el valor mínimo exigido por la norma ISSA A143 (2010) para uso en mezclas de micropavimento ,registrando un resultado superior al 65 %. Este cumplimiento se atribuye en gran parte al origen pluvial del material, el cual ha sido sometido naturalmente a procesos de arrastre y limpieza antes de su trituración, reduciendo así la presencia de impurezas.

Los agregados de las demás fuentes no alcanzan el valor requerido, lo que sugiere un mayor contenido de finos no deseados. Como alternativa de mejora, se plantea la incorporación de un proceso de lavado mecánico antes o durante la trituración, lo cual podría incrementar los valores de equivalente de arena y, por ende, mejorar la calidad del agregado. No obstante, esta solución implicaría un aumento en los costos operativos, lo cual debe ser considerado dentro del análisis técnico-económico del suministro de material para mezclas de micropavimento.

Del análisis integral de los parámetros requeridos para la selección de agregados en aplicaciones de micropavimento, se determina que el único material que cumple con la totalidad de las especificaciones técnicas establecidas por la norma ISSA A143 (2010) es el proveniente de la cantera San José – Tenguel. En función de este cumplimiento, se realizó la ejecución de los ensayos de desempeño correspondientes, con el propósito de desarrollar la fórmula maestra de diseño para mezcla de micropavimento utilizando dicho material como componente pétreo principal.

Para los ensayos de desempeño de la mezcla de micropavimento, se empleó el agregado proveniente de la cantera San José – Tenguel en combinación con emulsión asfáltica de curado controlado CQS-1H-P y CQS-1H-P(QK), suministrada por la empresa Emuldec. Estas dos emulsiones contienen el 62 % de asfalto residual modificado con 3 % de polímero tipo SBS, lo cual mejora las propiedades de adherencia, elasticidad y durabilidad del ligante. Previamente, se realizaron las pruebas correspondientes tanto a la emulsión como al residuo asfáltico, cuyos resultados se encuentran dentro de los rangos establecidos por las especificaciones técnicas vigentes para su uso en micropavimentación, garantizando así la idoneidad del ligante en la formulación de la mezcla.

A partir de los distintos ensayos de desempeño realizados a la mezcla de micropavimento, se ha determinado dos fórmulas maestras de trabajo, la primera denominada fórmula muestra A obtuvo la siguiente dosificación final: 100 % de agregado proveniente de la cantera San José – Tenguel, 1.1 % de relleno mineral

(cemento Portland tipo II), 9 % de agua potable y 10.8 % \pm 0.5 % de emulsión asfáltica CQS-1H-P. Mientras que para la formula maestra B lo siguiente: 100 % de agregado proveniente de la cantera San José – Tenguel, 1.0 % de relleno mineral (cemento Portland tipo II), 10 % de agua potable más 2% de sulfato de aluminio y 11.3 % \pm 0.5 % de emulsión asfáltica CQS-1H-P(QK).

Las dos fórmulas maestras de micropavimento presentan en la prueba de desempeño de tiempo de mezcla óptimos resultados, dando así cumplimiento a la norma ISSA A143 (2010), donde se especifica que debe ser mayor a 120 segundos. Sin embargo, para la formula maestra B se requirió ajustar su dosificación incrementando el contenido de agua y disminuyendo la cantidad de cemento en comparación con la formula maestra A; además se tuvo que incorporación sulfato de aluminio al 2% en el agua, de esta manera se pudo controlar el rompimiento de la emulsión; sin esta incorporación a la mezcla se observó una ruptura temprana, lo que provocaba que la mezcla no sea trabajable.

Para las dos formulaciones la cohesión a los 30 y 60 minutos son similares, alcanzando valores que permiten una adecuada trabajabilidad de la mezcla, asegurando un comportamiento estable, sin embargo a medida que el curado avanza se observa que a los 180 minutos la formulación A presenta mayor cohesión alcanzando 32 kg-cm a comparación de la formulación B que presenta 27 kg-cm; esta diferencia obedece a la incorporación de sulfato de aluminio a la mezcla de la formulación B, pues este componente retrasa la ruptura inicial lo que también modera el ritmo de ganancia de cohesión en las primeras horas; sin embargo para las dos formulaciones se permite la apertura al tráfico a los 120 segundos pues de acuerdo a la norma ISSA A143 (2010), una mezcla puede habilitarse al tráfico si supera los 20 kg-cm de cohesión.

El ensayo de abrasión en húmedo permitió evaluar la resistencia de la mezcla de micropavimento ante el desgaste superficial inducido por acción del agua; ambas formulas maestras cumplen con los parámetros establecidos en la norma ISSA A143 (2010), donde se indica que a los 6 días el valor debe ser máximo a 807 g/m². La

fórmula maestra A presenta menor pérdida de material por acción a la abrasión en húmedo que la fórmula maestra B; esto se atribuye a que para la mezcla que contiene sulfato de aluminio si bien su incorporación mejora su trabajabilidad también retarda la cohesión en la mezcla.

El ensayo de rueda de carga evalúa la resistencia de la mezcla de micropavimento frente a la acción de carga dinámica. Ambas fórmulas maestras cumplen con el valor máximo especificado en la norma ISSA A143 (2010) donde indica que para este ensayo el valor tolerable máximo es de 538 g/m². La fórmula maestra B presenta menor pérdida de material por acción de la carga dinámica; esto se debe a que la incorporación de sulfato de aluminio en la mezcla está influyendo en mejorar la adherencia entre el agregado y el ligante.

Ambas formulaciones de mezcla de micropavimento son técnicamente viables y cumplen con todos los requisitos establecidos en la norma ISSA A143 (2010). La elección para su uso en el mantenimiento vial debe realizarse en función de la carga vehicular de la vía y del tiempo de apertura al tráfico, por lo que se recomienda la formulación A en vías urbanas de tráfico moderado, debido a que esta mezcla presenta mayor cohesión y mejor resistencia al desgaste por humedad. La formulación B se recomienda en vías de alto tráfico como es el caso de la vía Perimetral y vía a la Costa en la ciudad de Guayaquil, esta mezcla presenta mejor comportamiento frente a cargas dinámicas de alto tráfico.

Los porcentajes que se indican en las fórmulas maestras están en función del peso seco del agregado; factor que se deberá tomar muy en cuenta en la ejecución del proyecto. El exceso de agua en la mezcla originará definitivamente un tiempo de rotura y curado más alto. Por lo que se recomienda que el agregado a ser utilizado se mantenga cubierto para evitar la variación de la humedad por efecto de la lluvia.

El cumplimiento riguroso de cualquiera de estas dos formulaciones es fundamental, ya que garantiza que la mezcla resultante cumpla con los requisitos técnicos establecidos para su aplicación en micropavimentación, proporcionando un

rendimiento adecuado frente a las condiciones de tráfico, además de asegurar la durabilidad y funcionalidad del tratamiento superficial.

Es importante mantener un control estricto de los materiales utilizados en el proyecto, a fin de asegurar que se cumplan las especificaciones establecidas en la fórmula maestra de la mezcla de micropavimento. Cualquier alteración en los materiales puede modificar la dosificación determinada en laboratorio, comprometiendo así el desempeño de la mezcla.

Referencias

- Albertis. (2024). *Abertis recicla y revaloriza el 80% de sus residuos impulsando la economía circular.*
- ASMT D-36. (2014). *Standart test method for softening point of bitumen.(Ring-and-Ball Apparatus).*
- Asobanca. (2022). *Informe Minas y Canteras de Material Petreo.*
- Asphalt Institute. (1982). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfálticas.*
- Asphalt Institute. (2004). *Basic Asphalt Emulsion Manual.*
- ASTM C-88. (2018). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by use of sodium sulfateror magnesium sulfate.*
- ASTM C-131. (2006). *Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine (2013th ed.).* ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0131>
- ASTM C-136. (2019). *Método de prueba estándar para Análisis por tamizado de agregados finos y gruesos.* ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM D- 2419. (2009). *Método de prueba para el valor de equivalente de arena en suelos y agregado fino.*
- ASTM D-5. (2013). *Método de prueba estándar para Penetración de Materiales Bituminosos.* <https://doi.org/10.1520/D0005-13>
- ASTM D-75. (2014). *Práctica estándar para el muestreo de agregados.* ASTM International. https://doi.org/10.1520/D0075_D0075M-14
- ASTM D-244. (1999). *Standard Test Methods and Practices for Emulsified Asphalts.*
- ASTM D977-20. (2020). *Specification for Emulsified Asphalt.* ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0977-20>
- ASTM D-4318. (2008). *MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E INDICE PLÁSTICO DE SUELOS.*
- Barrionuevo Luis. (2012). *DISEÑO DEL MICROPAVIMENTO UTILIZANDO EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO, CON AGREGADO PROCEDENTE DE LA CANTERA CALAGUA DE LA CIUDAD DE SAN MIGUEL, PROVINCIA DE BOLÍVAR.*

- Benites Raymundo. (2006). *MICROSUPERFICIE. APLICACIONES Y DESARROLLO EN LATINOAMERICA.*
- Boada Gustavo, & Urgiles Luis. (2011). *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MICROPAVIMENTOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS, PARA AGREGADOS DE CANTERAS DE GUAYLLABAMBA, PINTAG, PIFO, SAN ANTONIO Y NAYÓN EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO.*
- Bueno Jorge, & Pilay Irving. (2020). *Estudio a nivel de pre factibilidad, exploratoria y diagnóstica, para la rehabilitación y mantenimiento de pavimentos flexibles, analizando el deterioro debido a los impactos ambientales colocando micro pavimento.*
- Carlos, I. J., & Miranda, M. (2022). *Emulsiones asfálticas: concepto, aplicación, clasificación, rompimiento y curado.*
- Casanova Wendy. (2017). *Determinación de una metodología para caracterizar asfaltos modificados con polímero usados en pavimentos flexibles.*
- Committee Report. (2018). *Public Facilities Committee Report City of Newton In City Council.* <http://www.fp2.org/>.
- Coronel Orlando. (2017). *Micropavimento: Alternativa técnico-económica para la pavimentación del Asentamiento Humano Lomas de Marchan-Pucusana/Lima, 2017.*
- Díaz Palomino, Víctor Michel, Balbín Rodríguez, & Fiorella Erika. (2017). *Importancia en la selección de criterios de diseño en el desempeño de micropavimentos aplicado al proyecto vial Conococha – Recuay.* <http://hdl.handle.net/10757/622453>
- Espinoza Cristian. (2023). *ANÁLISIS DE LOS TIPOS DE MICROPAVIMENTO COMO ALTERNATIVA DE USO EN LA CONSERVACIÓN VIAL DE LA PROVINCIA DEL AZUAY.*
- Guerrero Sergio. (2019). *Guía para Inspectores Aplicación de Riego de Liga.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25371.72487>
- ISA TB-111. (2005). *Guía de esquema de procedimiento de diseño para sellos de lechada.*
- ISSA A143. (2010). *NORMA DE RENDIMIENTO RECOMENDADA PARA MICRO PAVIMENTACIÓN 1. ALCANCE.*
- ISSA TB-100. (2012). *Método de ensayo para la abrasión húmeda de sistemas de superficies tipo slurry.*
- ISSA TB-106. (2012). *Método de ensayo para medir la consistencia de sellador de tipo slurry.*
- ISSA TB-109. (2018). *Test Method for Measurement of Excess Asphalt In Bituminous Mixtures by Use of a Loaded Wheel Tester and Sand Adhesion.*

- ISSA TB-113. (2012). *Método de ensayo para determinar el tiempo de mezcla para sistemas de superficies tipo slurry.*
- ISSA TB-139. (2012). *Método de ensayo para determinar el desarrollo del endurecimiento y curado de sistemas de superficies de tipo slurry mediante un comprobador de cohesión.*
- ISSA TB-145. (2013). *Test Method for Determination of Methylene Blue Value (MBV) of Mineral Aggregate Fines.*
- Jiménez Mónica, Ulloa Andrea, & Múnera Juan. (2016). *GUÍA DE DISEÑO DE MEZCLA DE LABORATORIO PARA LOS SELLOS DE LECHADA ASFÁLTICA (SLURRY SEALS).*
- Lv, J., Huang, J., Wu, H., Zhang, Y., Qiu, J., Sun, X., Yin, Y., & Sun, X. (2021). Experience Study on Long-Life Microsurfacing with High Water Resistance Performance. *Advances in Materials Science and Engineering, 2021.*
<https://doi.org/10.1155/2021/2487478>
- Markolines. (2017). *Introduction to Microsurfacing Cost effective solutions for Maintenance of Highways/Major Bridges/Flyovers/ Runways.*
- Mercado Ronald, Bracho Carlos, & Avedaño Jorge. (2008). *EMULSIONES ASFÁLTICAS USOS - ROMPIMIENTO.*
- Ministerio De Obras Publicas. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES.*
- Moura, C. F. N., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Palha, C. A. O. F., & Sangiorgi, C. (2023). Development and Application of a Microsurfacing Mix Design Method to Assess the Influence of the Emulsion Type. *Applied Sciences (Switzerland), 13(13).*
<https://doi.org/10.3390/app13137925>
- Munera Juan. (2022). *Proceso de producción de las emulsiones asfálticas.*
- Solorzano Lucy, Moreno Luis, & Ponce Maria. (2022). *EMULSIONES ASFÁLTICAS EN LAS VÍAS DE PORTOVIEJO Y SU UTILIZACIÓN RACIONAL COMO SUSTITUTO DEL BETÚN.*
- Toscano Luis. (2014). *Diseño de Micro-pavimento aplicado como tratamiento superficial para el control de la Variación Térmica en el pavimento flexible de la vía Pifo-Cusubamba, como parte del mantenimiento preventivo.*
- US. Department of Transportation. (1994). *Condiciones para Prácticas de Diseño, Construcción y Rendimiento de Micro-pavimentos.*
- Yaacob Haryati, Hainin Mohd Rosli, Aziz Maniruzzaman, & Warid Naquiuddin. (2013). Bitumen emulsion in malaysia-a conspectus. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering), 65(3), 97–104.* <https://doi.org/10.11113/jt.v65.2153>