



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:

COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES SUPERPAVE Y MARSHALL UTILIZANDO 1.5% DE RESIDUOS DE CAUCHO DE LLANTAS CON RESPECTO AL MATERIAL PASANTE DEL TAMIZ NO. 50 COMO REEMPLAZO, CON MATERIAL DE LA PLANTA NARANJO LÓPEZ DE LA CIUDAD DE QUITO CON ASFALTO AC-20

Autores:

BRIAN OSWALDO CANDO ERAZO
RAMIRO HUMBERTO ERAZO HERNÁNDEZ

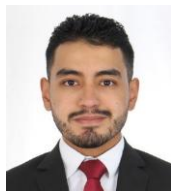
Director:

GUSTAVO PATRICIO YÁNEZ CAJAS

QUITO – Ecuador
2025



Autores:



Brian Oswaldo Cando Erazo
Ingeniero Civil
Candidato a Magíster en Vialidad y Transporte por la Universidad
Politécnica Salesiana – Sede Quito.
bcandoe@est.ups.edu.ec



Ramiro Humberto Erazo Hernández
Ingeniero Civil
Candidato a Magíster en Vialidad y Transporte por la Universidad
Politécnica Salesiana – Sede Quito.
rerazoh@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Gustavo Patricio Yáñez Cajas
Ingeniero Civil
Magister en Ingeniería del Transporte
gyanezc@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

Brian Oswaldo Cando Erazo

Ramiro Humberto Erazo Hernández

Comparación de desempeño de mezclas asfálticas calientes Superpave y Marshall utilizando 1.5% de residuos de caucho de llantas con respecto al material pasante del tamiz No. 50 como reemplazo, con material de la planta Naranjo López de la ciudad de Quito con asfalto AC-20

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicar mi maestría a Dios, por darme las herramientas necesarias para poder seguir mi segunda maestría en una de las áreas más bonitas de la ingeniería civil como es la Vialidad y Transporte, permitiéndome ampliar mis conocimientos y crecer profesionalmente.

También se la dedico a mi hija Briana Cando, por ser la motivación diaria que me impulsa a luchar por mis sueños y para que vea en mi un gran ejemplo de esfuerzo, sacrificio, constancia y perseverancia, para siempre luchar y poder conseguir las metas deseadas.

De igual forma se lo dedico a mi familia, por su apoyo incondicional para lograr todo lo que me proponga y darme su aliento en los momentos que sentía desfallecer, y, de manera especial se lo dedico a mi mamita Isaura y a mi papá Humberto (+), por enseñarme grandes valores y que siempre hay que esforzarse para lograr todo lo que uno anhele en esta vida.

A mi amor Karina Manguay, mi compañera de vida que estuvo en cada instante de la maestría, dándome su apoyo para que no me rindiera y pudiera culminar con éxito esta investigación.

Brian Cando

Dedico este trabajo a Dios, por haberme concedido la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para alcanzar este significativo logro en mi formación profesional.

A la memoria de mi querido padre, Humberto, quien fue, es y siempre será el pilar fundamental de mi vida. Su ejemplo de lucha incansable por el bienestar de sus hijos y su familia permanece como una guía inquebrantable en mi caminar.

A mi madre, Isaura, por su amor incondicional, sus bendiciones y sus sabios consejos, que sembraron en mí los valores y virtudes que han dado sentido y propósito a mi existencia.

De manera muy especial, dedico este logro a mis amados hijos, Ramiro y Ruth, quienes son mi mayor inspiración y la razón profunda de cada uno de mis esfuerzos. Y a mi querida esposa, Saskya, quien ha sido el motor que me impulsa día a día; su amor, comprensión y constante apoyo han sido luz y compañía en cada etapa de esta travesía. A ella le agradezco por ser consejera, amiga y compañera inseparable.

Ramiro Erazo

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme las fuerzas y la sabiduría necesaria para poder seguir esta maestría y poder realizar este trabajo de titulación que servirán para mi crecimiento profesional.

A mi compañero de tesis, mi querido tío Ramiro Erazo, con el cual pudimos hacer un gran equipo de trabajo, apoyándonos mutuamente para un mejor desarrollo de la maestría y de la presente investigación.

A todos los profesores que subieron impartir sus conocimientos y experiencias laborales para que sirvan como herramientas en nuestra vida profesional y de manera especial a mi tutor el Ing. Gustavo Yáñez por su valioso tiempo de tutorías brindadas para el desarrollo de este trabajo de titulación.

A mi familia que siempre me brindó su apoyo durante toda la maestría y el desarrollo de esta investigación para que nunca decaiga y siga con paso firme a la culminación de esta nueva meta y de manera especial a mi tío Danilo Erazo que siempre estuvo pendiente de mi con alguna frase de aliento, con su contribución económica y sus consejos para no decaer.

A los ingenieros, técnicos y tesistas del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana por su tiempo brindado en las explicaciones y realización de los diferentes ensayos tanto de los agregados como del asfalto.

A la Planta Naranja López por haber facilitado el material necesario para poder realizar la investigación como es el material pétreo y el Asfalto AC-20 y de igual forma al Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de la ciudad de Quito por haber brindado el polvo de caucho reciclado de las llantas de los aviones que se acumula en la pista para poderlo incorporar a la mezcla asfáltica analizada.

Brian Cando

Expreso mi más profundo reconocimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible esta investigación. A la Universidad Politécnica Salesiana, mi alma mater, por la formación académica integral y el respaldo institucional. A la Carrera de Ingeniería Civil y su cuerpo docente, quienes sembraron las bases del conocimiento técnico y la pasión por la investigación. Al Laboratorio de Materiales de Construcción de la UPS, donde se desarrollaron los ensayos experimentales fundamentales.

Al Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre por su visión innovadora en la gestión sostenible de residuos y por facilitar el acceso al polvo de caucho reciclado. A EP Petroecuador por el suministro del asfalto AC-20 y a la Planta Naranja López por los agregados pétreos de alta calidad, confirmando la disponibilidad de materiales locales apropiados para infraestructuras de alto desempeño.

A mi director de Tesis por su guía experta, dedicación y apoyo constante durante todo el proceso de investigación. Sus conocimientos técnicos y orientación metodológica fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de este trabajo. Al equipo de profesores evaluadores, quienes con sus observaciones técnicas y rigor académico contribuyeron al perfeccionamiento de esta investigación.

A mi familia, pilar fundamental cuyo apoyo incondicional, comprensión y aliento constante hicieron posible la culminación de esta etapa académica. A mis compañeros de carrera y amigos, quienes compartieron conocimientos y experiencias que enriquecieron mi formación universitaria. Al personal técnico de laboratorio, cuya experiencia especializada garantizó la validez científica de los datos experimentales.

Ramiro Erazo

Tabla de Contenido

Resumen	17
Abstract	18
1. Introducción	19
2. Determinación del Problema.....	21
2.1. Objetivos.....	23
2.1.1. Objetivo General.....	23
2.1.2. Objetivos Específicos	23
3. Marco Teórico Referencial	24
3.1. Antecedentes de la Investigación.....	24
3.1.1. Investigaciones Internacionales Recientes (2020-2024).....	24
3.1.2. Avances en Tecnología de Procesamiento	25
3.1.3. Estudios Comparativos de Metodologías de Diseño	26
3.1.4. Investigaciones en Aplicaciones Especializadas	26
3.2. Metodologías de Diseño de Mezclas Asfálticas: Enfoques Contemporáneos ...	27
3.2.1. Evolución del Método Marshall.....	27
3.2.2. Desarrollo y Ventajas del Sistema Superpave	28
3.2.3. Comparación de Eficiencia entre Metodologías	32
3.3. Modificación de Asfaltos con Polvo de Caucho: Desarrollos Recientes.....	33
3.3.1. Mecanismos de Interacción Asfalto-Caucho	33
3.3.2. Tecnologías de Reducción de Viscosidad	34
3.3.3. Aspectos Ambientales y de Sostenibilidad	34
3.4. Pavimentos Aeroportuarios: Requerimientos Especializados	35
3.4.1. Condiciones Operacionales Críticas.....	35
3.4.2. Metodologías de Evaluación Especializadas.....	38
3.4.3. Innovaciones en Materiales para Pavimentos Aeroportuarios.....	39
3.5. Marco Normativo Actualizado.....	40
3.5.1. Normativas Internacionales Recientes	40
3.5.2. Especificaciones para Materiales Modificados	40
3.5.3. Marcos Regulatorios para Aplicaciones Aeroportuarias	41
3.6. Tendencias Futuras y Direcciones de Investigación	41
3.6.1. Tecnologías Emergentes en Modificación de Asfaltos	41
3.6.2. Integración de Múltiples Materiales Reciclados	42

3.6.3. Modelado Predictivo y Caracterización Avanzada	42
4. Materiales y Metodología	44
4.1. Metodología	44
4.1.1. Nivel de Investigación.....	44
4.1.2. Población y Muestra	44
4.2. Datos de los Materiales	45
4.2.1. Agregados Pétreos.....	45
4.2.2. Cemento Asfáltico Y PCR	46
4.3. Ensayos para Caracterización de Materiales.....	46
4.3.1. Agregados Pétreos.....	49
4.3.1.1 Análisis Granulométrico (ASTM C136, NTE INEN 0696:2011)	49
4.3.1.2 Gravedad Específica (ASTM C127-C128 NTE INEN 0857:2010, NTE INEN 0856:2010).....	61
4.3.1.3 Equivalente de Arena (ASTM D 2419 AASTHTO T176)	67
4.3.1.4 Desgaste por Abrasión (ASTM C131, NTE INEN 0860:2011).....	68
4.3.2. PCR.....	77
4.3.2.1 Cuarteo (ASTM C 702)	77
4.3.2.2 Secado y Tamizado	79
4.3.3. Cemento Asfáltico	79
4.3.3.1 Punto de Inflamación Copa Cleveland. (ASTM D-92, NTE INEN 0808:2013).....	79
4.3.3.2 Viscosidad Dinámica (ASTM D-4402)	84
4.3.3.3 Punto de Ablandamiento (ASTM D-36).....	87
4.3.3.4 Ensayo de Penetración (ASTM D5).....	90
4.3.3.5 Ductilidad (ASTM D 113, NTE INEN 0916).....	93
4.3.3.6 Horno de Película Rodante, RTFO (ASTM D 2872).....	97
4.3.3.7 Determinación de las Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico Usando un Reómetro Dinámico de Corte	97
4.3.3.8 Gravedad Específica. (ASTM D 70, NTE INEN 923).....	102
4.3.3.9 Resumen de Caracterización del Asfalto.....	105
4.4. Diseño de Mezclas Asfálticas y Pruebas de Desempeño.....	106
4.4.1. Método Marshall	106
4.4.1.1 Determinación de la Granulometría de Diseño	107
4.4.1.2 Determinación del Porcentaje Óptimo Teórico de Asfalto.....	113
4.4.1.3 Temperaturas de Mezcla y Compactación.....	114

4.4.1.4	Elaboración de Briquetas	114
4.4.1.5	Propiedades Volumétricas	122
4.4.1.6	Método Marshall para Elaboración de Briquetas con el 1.5% de PCR 138	
4.4.2.	Método Superpave	141
4.4.2.1	Ensayo de Horno de Película Rodante	142
4.4.2.2	Determinación de las Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico Usando un Reómetro Dinámico de Corte	143
4.4.2.1	Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas en Caliente	148
5.	Resultados y Discusión	168
5.1.	Análisis de las Pruebas de Caracterización de los Materiales.....	168
5.1.1.	Agregados Pétreos.....	168
5.1.2.	Asfalto AC-20	170
5.2.	Análisis del Ensayo Marshall.....	173
5.3.	Análisis de los Ensayos de Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas con el 1.5% de PCR 175	
6.	Conclusiones.....	179
7.	Recomendaciones.....	182
8.	Referencias	184

Índice de Tablas

Tabla 1. Desarrollo y Ventajas del Sistema Superpave	29
Tabla 2. Granulometría de Agregado Fino (Arena)	52
Tabla 3. Granulometría Agregado Intermedio	55
Tabla 4. Granulometría Agregado Grueso	58
Tabla 5. Gravedad Específica Agregado Fino	63
Tabla 6. Gravedad Específica Agregado Intermedio	64
Tabla 7. Gravedad Específica Agregado Grueso	65
Tabla 8. Lecturas del Ensayo de Equivalente de Arena Realizado en la UPS	67
Tabla 9. Lecturas del Ensayo de Equivalente de Arena Realizado en la PUCE	68
Tabla 10. Especificaciones para la Carga de la Máquina de Los Ángeles.....	68
Tabla 11. Gradación de las Muestras de Ensayo.....	69
Tabla 12. Porcentaje de Abrasión Agregado Gradación C	73
Tabla 13. Porcentaje de Abrasión Agregado Gradación B	73
Tabla 14. Comprobación de las Características de los Agregados	73
Tabla 15. Punto de Inflamación del Asfalto AC-20	81
Tabla 16. Viscosidad Rotacional Asfalto AC-20	85
Tabla 17. Punto de Ablandamiento	88
Tabla 18. Datos Obtenidos del Ensayo de Penetración	91
Tabla 19. Índice de Penetración	93
Tabla 20. Datos Obtenidos del Ensayo de Ductilidad	95
Tabla 21. Datos Obtenidos del Ensayo de Horno de Película Rodante	97
Tabla 22. Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico a 64°C en Condición Original, Muestra 1.....	98
Tabla 23. Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico a 25°C, Muestra 1	99
Tabla 24. Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico a 64°C Bajo Condiciones Modificadas, Muestra 1.....	99
Tabla 25. Densidad de Materiales Bituminosos Semisólidos	102
Tabla 26. Verificación de Requisitos del Asfalto.....	105
Tabla 27. Porcentaje de Agregados en la Mezcla Asfáltica.....	107

Tabla 28. <i>Tamizado del Material 1/2"</i>	108
Tabla 29. <i>Tamizado del Material 3/4"</i>	108
Tabla 30. <i>Tamizado del Material Fino (Arena)</i>	109
Tabla 31. <i>Compilación de Porcentajes</i>	109
Tabla 32. <i>Graduación Combinada para la Mezcla</i>	110
Tabla 33. <i>Límites Granulométricos para Mezclas Asfálticas en Planta</i>	110
Tabla 34. <i>Porcentajes Tentativos de Asfalto</i>	114
Tabla 35. <i>Densidad Rice Obtenida para Cada Porcentaje de Asfalto en la Mezcla</i>	124
Tabla 36. <i>Especificaciones Criterios Marshall</i>	126
Tabla 37. <i>Propiedades Volumétricas con Cada Porcentaje de Asfalto para el Ensayo Marshall</i>	131
Tabla 38. <i>Resultados Ensayo Marshall</i>	132
Tabla 39. <i>Datos del Ensayo Marshall para un Porcentaje Óptimo de Asfalto del 6%</i> ..	135
Tabla 40. <i>Datos del Ensayo Marshall para un Porcentaje Óptimo de Asfalto del 6%, con el 1.5% de PCR</i>	139
Tabla 41. <i>Datos del Ensayo Marshall para un Porcentaje Óptimo de Asfalto del 6%</i> ..	140
Tabla 42. <i>Determinación del Cambio de Muestras</i>	142
Tabla 43. <i>Información de la Muestra</i>	142
Tabla 44. <i>Especificación del Producto y Cumplimiento con Respecto a la Especificación</i>	143
Tabla 45. <i>Registros de la Muestra (64°C)</i>	143
Tabla 46. <i>Evaluación de la Muestra (64°C)</i>	144
Tabla 47. <i>Especificación y Cumplimiento con Respecto a la Misma (64°C)</i>	144
Tabla 48. <i>Registros de la Muestra (25°C)</i>	144
Tabla 49. <i>Evaluación de la Muestra (25°C)</i>	145
Tabla 50. <i>Especificación y Cumplimiento con Respecto a la Misma (25°C)</i>	145
Tabla 51. <i>Registros de la Muestra (64°C)</i>	145
Tabla 52. <i>Evaluación de la Muestra (64°C)</i>	145
Tabla 53. <i>Especificación y Cumplimiento con Respecto a la Misma (25°C)</i>	146
Tabla 54. <i>Módulo Dinámico (-10°C), Núcleo 1</i>	149
Tabla 55. <i>Módulo Dinámico (4°C), Núcleo 1</i>	150

Tabla 56. <i>Módulo Dinámico (21°C), Núcleo 1</i>	150
Tabla 57. <i>Módulo Dinámico (37°C), Núcleo 1</i>	151
Tabla 58. <i>Módulo Dinámico (54°C), Núcleo 1</i>	152
Tabla 59. <i>Módulo Dinámico (-10°C), Núcleo 2</i>	155
Tabla 60. <i>Módulo Dinámico (4°C), Núcleo 2</i>	155
Tabla 61. <i>Módulo Dinámico (21°C), Núcleo 2</i>	156
Tabla 62. <i>Módulo Dinámico (37°C), Núcleo 2</i>	157
Tabla 63. <i>Módulo Dinámico (54°C), Núcleo 2</i>	157
Tabla 64. <i>Módulo Dinámico (-10°C), Núcleo 3</i>	161
Tabla 65. <i>Módulo Dinámico (4°C), Núcleo 3</i>	162
Tabla 66. <i>Módulo Dinámico (21°C), Núcleo 3</i>	162
Tabla 67. <i>Módulo Dinámico (37°C), Núcleo 3</i>	163
Tabla 68. <i>Módulo Dinámico (54°C), Núcleo 3</i>	164
Tabla 69. <i>Resultados de la Granulometría, Faja de 3/4"</i>	168
Tabla 70. <i>Resultados de la Absorción de los Agregados</i>	169
Tabla 71. <i>Resultados del Ensayo de Abrasión</i>	169
Tabla 72. <i>Resultados del Ensayo de Equivalente de Arena</i>	169
Tabla 73. <i>Resultados del Ensayo de Punto de Inflamación</i>	170
Tabla 74. <i>Resultados del Ensayo de Viscosidad</i>	171
Tabla 75. <i>Resultados del Ensayo de Punto de Ablandamiento</i>	171
Tabla 76. <i>Resultados del Ensayo de Penetración</i>	171
Tabla 77. <i>Resultados del Ensayo de Ductilidad</i>	172
Tabla 78. <i>Resultados del Ensayo RTFO</i>	172
Tabla 79. <i>Resultados de las Propiedades Reológicas</i>	173

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Condiciones Operacionales Críticas</i>	36
Figura 2. <i>Ubicación de la Planta Naranja López</i>	45
Figura 3. <i>Colocación de Material en los Tamices para el Ensayo de Granulometría</i>	51
Figura 4. <i>Ensayo de Granulometría – Manual</i>	52
Figura 5. <i>Medición de Peso Después del Tamizado</i>	52
Figura 6. <i>Ensayo de Gravedad Específica de los Agregados</i>	62
Figura 7. <i>Toma de Peso del Envase con Agregado para el Ensayo de Pesos Específicos</i>	62
Figura 8. <i>Colocación del Líquido para el Ensayo de Gravedad Específica</i>	62
Figura 9. <i>Ensayo Resistencia a la Abrasión, Máquina de Los Ángeles</i>	71
Figura 10. <i>Colocación de las Esferas de Acero en la Máquina de Los Ángeles</i>	72
Figura 11. <i>Encendido de la Máquina de Los Ángeles</i>	72
Figura 12. <i>Conformación de la Pila Cónica</i>	78
Figura 13. <i>Aplanamiento de la Pila</i>	78
Figura 14. <i>División de la Muestra en Cuatro Partes Iguales</i>	79
Figura 15. <i>Desintegración de Terrones</i>	80
Figura 16. <i>Ensayo de Punto de Inflamación – Copa Cleveland</i>	81
Figura 17. <i>Ensayo de Viscosidad Dinámica</i>	85
Figura 18. <i>Ensayo de Punto de Ablandamiento (Inicio)</i>	87
Figura 19. <i>Ensayo de Punto de Ablandamiento (Intermedio)</i>	88
Figura 20. <i>Ensayo de Punto de Ablandamiento (Final)</i>	88
Figura 21. <i>Ensayo de Penetración</i>	90
Figura 22. <i>Ensayo de Ductilidad (Inicio del Ensayo)</i>	94
Figura 23. <i>Ensayo de Ductilidad (Fase Intermedia del Ensayo)</i>	94
Figura 24. <i>Ensayo de Ductilidad (Fase Final del Ensayo)</i>	94
Figura 25. <i>Incorporación de Asfalto a los Agregados</i>	115
Figura 26. <i>Mezcla Asfáltica Previa a la Combinación</i>	115
Figura 27. <i>Mezcla de los Agregados con el Asfalto</i>	116
Figura 28. <i>Verificación de la Temperatura de Mezclado (131°C)</i>	116
Figura 29. <i>Proceso de Vertido de la Mezcla en los Moldes</i>	117

Figura 30. <i>Compactación Mecánica de las Briquetas</i>	117
Figura 31. <i>Compactación Mecánica de las Briquetas</i>	118
Figura 32. <i>Extracción de la Briqueta del Molde</i>	118
Figura 33. <i>Evaluación de Peso de las Briquetas</i>	121
Figura 34. <i>Briquetas Señalizadas en Función del Porcentaje de Asfalto Contenido</i>	122

Índice de Gráficas

Gráfica 1. <i>Curva Granulométrica – Agregado Fino</i>	53
Gráfica 2. <i>Curva Granulométrica – Agregado Intermedio</i>	56
Gráfica 3. <i>Curva Granulométrica – Agregado Grueso</i>	59
Gráfica 4. <i>Granulometría Faja de 3/4"</i>	111
Gráfica 5. <i>Porcentaje de Vacíos con Aire vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla</i>	132
Gráfica 6. <i>Gravedad Específica Bulk vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla</i>	133
Gráfica 7. <i>Volumen de Vacíos en la Mezcla vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla</i>	133
Gráfica 8. <i>Estabilidad vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla</i>	134
Gráfica 9. <i>Flujo vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla</i>	134
Gráfica 10. <i>Filler/betún vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla</i>	135
Gráfica 11. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (-10°C), Núcleo 1</i>	149
Gráfica 12. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (4°C), Núcleo 1</i>	150
Gráfica 13. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (21°C), Núcleo 1</i>	151
Gráfica 14. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (37°C), Núcleo 1</i>	151
Gráfica 15. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (54°C), Núcleo 1</i>	152
Gráfica 16. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (-10°C), Núcleo 2</i>	155
Gráfica 17. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (4°C), Núcleo 2</i>	156
Gráfica 18. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (21°C), Núcleo 2</i>	156
Gráfica 19. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (37°C), Núcleo 2</i>	157
Gráfica 20. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (54°C), Núcleo 2</i>	158
Gráfica 21. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (-10°C), Núcleo 3</i>	161
Gráfica 22. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (4°C), Núcleo 3</i>	162
Gráfica 23. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (21°C), Núcleo 3</i>	163
Gráfica 24. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (37°C), Núcleo 3</i>	163
Gráfica 25. <i>Módulo Dinámico vs Frecuencia (54°C), Núcleo 3</i>	164
Gráfica 26. <i>Comparación del Valor de Estabilidad</i>	173
Gráfica 27. <i>Comparación del Valor de Flujo</i>	174
Gráfica 28. <i>Módulos Dinámicos Máximos a una Temperatura de -10 °C</i>	175
Gráfica 29. <i>Módulos Dinámicos Máximos a una Temperatura de 54 °C</i>	176
Gráfica 30. <i>Módulos Dinámicos Máximos a una Temperatura de 21 °C</i>	176

COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES
SUPERPAVE Y MARSHALL
UTILIZANDO 1.5% DE RESIDUOS DE
CAUCHO DE LLANTAS CON
RESPECTO AL MATERIAL PASANTE
DEL TAMIZ NO. 50 COMO
REEMPLAZO, CON MATERIAL DE LA
PLANTA NARANJO LÓPEZ DE LA
CIUDAD DE QUITO CON ASFALTO AC-
20

Autores:

BRIAN OSWALDO CANDO ERAZO
RAMIRO HUMBERTO ERAZO HERNÁNDEZ

Resumen

La creciente demanda de soluciones sostenibles en infraestructura vial ha motivado la incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas. Esta investigación evalúa comparativamente el desempeño de mezclas asfálticas calientes diseñadas mediante los métodos Marshall y Superpave, incorporando 1.5% de polvo de caucho reciclado (PCR) proveniente de neumáticos de avión como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50.

El estudio utilizó materiales pétreos y asfalto AC-20 de la planta Naranjo López en Quito, realizando ensayos de caracterización física y mecánica conforme a normativas ASTM, AASHTO e INEN. Se evaluaron parámetros como granulometría, gravedad específica, desgaste por abrasión, estabilidad Marshall, flujo y módulo dinámico a diferentes temperaturas mediante el protocolo Superpave. Los resultados demostraron que las mezclas modificadas con PCR exhibieron estabilidad ligeramente superior a las convencionales en el método Marshall, manteniéndose dentro de los rangos establecidos por la normativa ecuatoriana MOP-001-F-2002. En el método Superpave, las mezclas mostraron rigidez estructural adecuada a temperaturas intermedias y comportamiento favorable ante deformación permanente, validando su uso en zonas de tráfico medio y alto.

La comparación metodológica destacó la superioridad del sistema Superpave para simular condiciones reales de carga y clima, resultando más robusto y predictivo para el desempeño a largo plazo. La incorporación de PCR proporciona beneficios estructurales y ambientales simultáneos, reduciendo la demanda de agregados vírgenes y promoviendo el reciclaje de neumáticos de aeronaves, contribuyendo así a la gestión responsable de residuos especiales en Ecuador.

Palabras clave:

Mezclas asfálticas en caliente, Pavimentos modificados, Polvo de caucho reciclado, Método Marshall, Método Superpave, Neumáticos de Avión.

Abstract

The growing demand for sustainable solutions in road infrastructure has motivated the incorporation of recycled materials into asphalt mixtures. This research comparatively evaluates the performance of hot mix asphalts designed using the Marshall and Superpave methods, incorporating 1.5% recycled rubber powder (CRP) from aircraft tires as a replacement for the material passing the No. 50 sieve.

The study used stone materials and AC-20 asphalt from the Naranjo López plant in Quito, performing physical and mechanical characterization tests in accordance with ASTM, AASHTO, and INEN standards. Parameters such as particle size distribution, specific gravity, abrasive wear, Marshall stability, flow, and dynamic modulus were evaluated at different temperatures using the Superpave protocol. The results showed that the PCR-modified mixtures exhibited slightly higher stability than conventional mixtures using the Marshall method, remaining within the ranges established by Ecuadorian regulation MOP-001-F-2002. Using the Superpave method, the mixtures demonstrated adequate structural stiffness at intermediate temperatures and favorable behavior under permanent deformation, validating their use in medium- and high-traffic areas.

The methodological comparison highlighted the superiority of the Superpave system in simulating realistic loading and climate conditions, proving more robust and predictive for long-term performance. The incorporation of PCR provides simultaneous structural and environmental benefits, reducing the demand for virgin aggregates and promoting the recycling of aircraft tires, thus contributing to the responsible management of special waste in Ecuador.

Palabras clave:

Hot mix asphalt, Pavement sustainability, Recycled crumb rubber, Marshall method, Superpave method, Aircraft tires.

1. Introducción

La industria de la construcción vial enfrenta continuos desafíos para desarrollar materiales más sostenibles, económicos y de mejor desempeño. En este contexto, la incorporación de materiales reciclados en mezclas asfálticas representa una alternativa prometedora que contribuye tanto a la gestión de residuos como al mejoramiento de las propiedades mecánicas del pavimento.

El caucho proveniente de neumáticos fuera de uso constituye uno de los residuos más problemáticos en términos ambientales debido a su resistencia a la degradación y su volumen creciente. La reutilización de este material en mezclas asfálticas no solo ofrece una solución al problema de disposición de estos residuos, sino que también puede mejorar significativamente las características del pavimento, incluyendo mayor flexibilidad, resistencia a la fatiga y reducción del ruido.

Las metodologías Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) y Marshall constituyen los dos enfoques principales para el diseño de mezclas asfálticas calientes. Mientras que el método Marshall, desarrollado en la década de 1940, se basa en parámetros empíricos como la estabilidad y flujo, el método Superpave, introducido en los años 1990, incorpora criterios de desempeño más avanzados que consideran las condiciones climáticas y de tráfico específicas de cada proyecto.

La granulometría de los agregados pétreos juega un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas. El material que pasa el tamiz No. 50 (abertura de 0.297 mm) forma parte de la fracción fina que influye directamente en la trabajabilidad, compactabilidad y propiedades mecánicas finales de la mezcla. La sustitución parcial de este material fino por caucho molido representa una estrategia innovadora que puede optimizar la interacción entre los componentes de la mezcla.

El presente estudio se enfoca en evaluar comparativamente el desempeño de mezclas asfálticas calientes diseñadas mediante las metodologías Superpave y Marshall, incorporando 1.5% de residuos de caucho de llantas como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50. Para esta investigación se utilizarán materiales pétreos provenientes de la Planta Naranjo López, ubicada en la ciudad de Quito, y cemento asfáltico AC-20, materiales representativos de las condiciones locales de construcción vial en Ecuador.

La relevancia de esta investigación radica en la necesidad de generar conocimiento técnico que permita la implementación de tecnologías más sostenibles en la construcción de pavimentos en el contexto ecuatoriano, contribuyendo simultáneamente a la reducción del impacto ambiental y al mejoramiento de la infraestructura vial nacional. Los resultados obtenidos proporcionarán información valiosa para la toma de decisiones en futuros proyectos de pavimentación que consideren la incorporación de materiales reciclados.

2. Determinación del Problema

El Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, como infraestructura crítica de transporte aéreo en el país, requiere pavimentos con alto desempeño mecánico y durabilidad frente a cargas pesadas y condiciones ambientales variables. Dentro de este contexto, surge la necesidad de optimizar el diseño de mezclas asfálticas para calles de rodaje y plataformas, buscando mejorar su resistencia, sostenibilidad y vida útil. Uno de los desafíos actuales es incorporar materiales reciclados que no solo reduzcan el impacto ambiental, sino que también mantengan o mejoren el comportamiento estructural del pavimento.

Los pavimentos aeroportuarios enfrentan condiciones de operación extremadamente exigentes que los diferencian significativamente de los pavimentos viales convencionales. Las aeronaves comerciales generan cargas estáticas y dinámicas que superan considerablemente las de vehículos terrestres, mientras que el tráfico aeronáutico implica ciclos repetitivos de carga que demandan alta resistencia a la fatiga del material. Adicionalmente, estos pavimentos están expuestos a variaciones térmicas extremas, radiación UV intensa y condiciones climáticas adversas sin protección alguna, lo que acelera los procesos de deterioro. La revisión de estas infraestructuras radica en que cualquier falla en el pavimento puede comprometer la seguridad operacional del aeropuerto, generando riesgos inaceptables y costos económicos elevados tanto por reparaciones como por interrupciones en las operaciones.

La problemática ambiental constituye otro aspecto fundamental que justifica esta investigación. En Ecuador se generan aproximadamente 1.2 millones de neumáticos de desecho anualmente, de los cuales solo un pequeño porcentaje recibe tratamiento adecuado. La mayoría termina en botaderos a cielo abierto o es incinerada informalmente, generando emisiones tóxicas y ocupando espacios que tardan décadas en degradarse. Entre los materiales reciclados disponibles, el polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso representa una alternativa

técnica y ambientalmente viable que podría contribuir significativamente a la gestión de estos residuos. Sin embargo, su incorporación en pavimentos de alto riesgo como los aeroportuarios requiere validación técnica rigurosa que garantice el mantenimiento o mejoramiento del desempeño estructural.

Las limitaciones metodológicas en el diseño de mezclas asfálticas constituyen un obstáculo adicional para el desarrollo de soluciones innovadoras. Aunque el método Marshall es el más aplicado en Ecuador debido a su simplicidad y tradición, el método Superpave presenta ventajas significativas en cuanto a la simulación de condiciones reales de carga y clima, especialmente relevantes para aplicaciones aeroportuarias. Esta situación genera incertidumbre sobre cuál metodología es más apropiada para las condiciones específicas del país cuando se incorporan materiales reciclados. No se ha evaluado de manera comparativa el desempeño mecánico de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho en relación con las metodologías de diseño Superpave y Marshall para aplicaciones de alto impacto, ni se cuenta con datos experimentales que validen el comportamiento de estas mezclas frente a parámetros clave como la deformación permanente, la tracción indirecta y el control volumétrico bajo condiciones de compactación de laboratorio similares a las del campo.

El problema fundamental radica en la falta de estudios locales que vinculen el uso de polvo de caucho reciclado con métodos de diseño estructuralmente comparativos, limitando así el desarrollo de mezclas asfálticas más sostenibles y eficientes para infraestructuras críticas. Los criterios de diseño actuales no contemplan específicamente la incorporación de polvo de caucho como reemplazo de material fino en infraestructuras aeroportuarias, y esta brecha en el conocimiento impide tomar decisiones técnicas fundamentadas en la selección del método de diseño más adecuado, tanto en términos de rendimiento como de sostenibilidad, para su aplicación en proyectos de infraestructura de gran magnitud como el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre.

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

- Evaluar una mezcla asfáltica por el método Marshall y Superpave con material de la Planta Naranjo López de la ciudad de Quito con asfalto AC-20.

2.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de la Planta Naranjo López de la ciudad de Quito aplicando normativa INEN Y ASTM.
- Realizar una dosificación de mezcla asfáltica utilizando los porcentajes de diseño de la EPMMOP mediante el método Marshall.
- Diseñar una mezcla asfáltica utilizando el método Superpave considerando los porcentajes de la EPMMOP.
- Realiza pruebas de desempeño: tracción diametral y flexión en muestras de mezclas asfálticas.
- Establecer una comparación de los resultados obtenidos por los métodos Marshall y Superpave.

3. Marco Teórico Referencial

3.1. Antecedentes de la Investigación

3.1.1. Investigaciones Internacionales Recientes (2020-2024)

El estudio de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado ha experimentado un significativo avance en los últimos años, particularmente enfocándose en aspectos de sostenibilidad y optimización del desempeño. Franesqui et al. (2022) evaluaron el comportamiento real de mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado utilizadas como capa de superficie en carreteras de alto volumen de tráfico, construyendo diferentes secciones viales bajo distintas condiciones climáticas y utilizando mezclas de control con ligantes tradicionales modificados con polímeros SBS y mezclas modificadas con caucho granulado. Los resultados de esta investigación después de 63 meses de servicio mostraron que las mezclas modificadas con caucho mantuvieron propiedades superiores en términos de densidad, rigidez y resistencia a la fatiga.

Franesqui et al. (2023) desarrollaron una investigación innovadora combinando tecnologías limpias para mezclas asfálticas que incluían la reutilización de agregados residuales, caucho granulado de desecho de neumáticos y aditivos de mezcla asfáltica tibia. Esta investigación demostró que la combinación de estas tres tecnologías proporciona una solución prometedora para producir materiales más sostenibles mediante la reutilización de dos tipos diferentes de materiales de desecho, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones y optimización de recursos.

En términos de comportamiento térmico y reológico, Wang et al. (2023) investigaron la optimización de la temperatura de envejecimiento a corto plazo de asfaltos modificados con caucho granulado, determinando que los ligantes con mayor viscosidad necesitan temperaturas RTFOT elevadas de 173°C a 193°C, especialmente cuando se simula el envejecimiento a corto plazo de mezclas con

mayores vacíos de aire. Los hallazgos indicaron que el hinchamiento y degradación del caucho granulado contribuyen a mejorar las propiedades anti-envejecimiento del material.

Jin et al. (2023) realizaron una investigación de campo sobre la reconstrucción de pavimentos asfálticos con mezclas modificadas con caucho granulado en regiones frías, evaluando tanto el comportamiento en laboratorio como en campo. Los resultados demostraron que el pavimento con modificación de caucho redujo el ruido en más de 3 dB a la velocidad de diseño de 50 mph (80 km/h), reduciendo la energía del ruido en más del 50%, y mostró un rating PASER que aumentó de 2 (condición muy pobre) en 2017 a 10 (excelente) en 2019 después de la reconstrucción.

3.1.2. Avances en Tecnología de Procesamiento

Yu et al. (2022) desarrollaron pavimentos asfálticos porosos de bajo ruido utilizando ligantes de asfalto-caucho de alta viscosidad, incorporando grandes cantidades de caucho granulado al ligante asfáltico junto con Sasobit y aceite de cocina usado como aditivos reductores de viscosidad. La investigación estableció un método sistemático de evaluación para el desempeño de reducción de ruido de mezclas asfálticas, determinando que debido al efecto suavizante del aceite de cocina usado y la alta relación asfalto-agregado, la capacidad de amortiguamiento de las mezclas asfálticas porosas con aceite de cocina usado es superior.

En cuanto a aspectos ambientales y de toxicidad, Farina et al. (2024) realizaron el primer estudio crítico sobre el comportamiento de lixiviación de metales de mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado de neumáticos de desecho. Esta investigación es fundamental para abordar las preocupaciones sobre la potencial toxicidad del betón y materiales reciclados, estableciendo que las medidas de protección estrictas son necesarias en los procedimientos técnicos para prevenir la lixiviación de toxinas granulares y metales pesados.

3.1.3. Estudios Comparativos de Metodologías de Diseño

Khan et al. (2025) desarrollaron una investigación de optimización del desempeño de pavimentos asfálticos utilizando el espesor de película de ligante como criterio en un diseño de mezcla innovador comparado con los métodos Marshall y Superpave. Esta investigación representa un avance significativo en la evolución de metodologías de diseño, sugiriendo que el espesor de película de ligante puede ser un parámetro crucial para mejorar la durabilidad y resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas.

Zumrawi y Sheikh Edrees (2016) establecieron que la revisión de literatura reveló que el diseño de mezclas Superpave proporciona mejor desempeño que el método Marshall, especialmente para carreteras expuestas a cargas de tráfico pesado y cambios climáticos. Sus resultados de laboratorio demostraron que las mezclas Superpave mostraron mejores resultados en las propiedades estudiadas comparadas con las mezclas Marshall, probando la superioridad de las mezclas Superpave sobre las Marshall.

Al-Qadi et al. (2007) encontraron que el contenido de ligante de las mezclas diseñadas con Superpave es menor que las mezclas diseñadas con Marshall TTM, y las mezclas TTM exhiben valores de densificación bajos. Un estudio en Jordania demostró la superioridad de las mezclas Superpave sobre las Marshall, mientras que investigaciones en India mostraron que el compactador giratorio Superpave es capaz de lograr un menor contenido de vacíos de aire que el que se puede lograr con el compactador de martillo mecánico Marshall.

3.1.4. Investigaciones en Aplicaciones Especializadas

Leong et al. (2023) reportaron que aproximadamente mil millones de neumáticos al final de su vida útil son descartados globalmente cada año, sin embargo, el uso de caucho granulado generado de estos neumáticos en la construcción de carreteras sigue siendo insignificante. La adición de caucho granulado no solo permite el consumo de una cantidad significativa de caucho de desecho, sino que

también proporciona numerosos beneficios al pavimento asfáltico, mejorando la resistencia al ahuellamiento, agrietamiento por fatiga y durabilidad de las carreteras.

Cubas et al. (2024) desarrollaron una investigación sobre mezclas asfálticas modificadas incorporando caucho reciclado pulverizado y pavimento asfáltico reciclado, estableciendo que la utilización de altos contenidos de caucho granulado de neumáticos reciclados en el desarrollo de ligantes de asfalto-caucho modificado para aplicaciones viales representa una alternativa viable. Sus hallazgos contribuyen al desarrollo de formulaciones ternarias de ligantes que optimizan el uso de materiales reciclados en pavimentación.

3.2. Metodologías de Diseño de Mezclas Asfálticas: Enfoques Contemporáneos

3.2.1. Evolución del Método Marshall

Bhatti (2021) establece que el método Marshall, a pesar de sus limitaciones, sigue siendo probablemente el método de diseño de mezclas más ampliamente utilizado en el mundo debido a su simplicidad, compacidad y bajo costo. El ensayo Marshall para estabilidad y flujo fue diseñado para estresar toda la muestra en lugar de solo una porción de ella. Sin embargo, existe un sentimiento creciente entre los tecnólogos del asfalto de que el método Marshall ha superado su utilidad para el diseño moderno de mezclas asfálticas, ya que el diseño de mezclas Marshall aborda principalmente la determinación del contenido de ligante asfáltico, mientras que Superpave aborda todos los elementos del diseño de mezcla.

El método Marshall presenta limitaciones significativas en la simulación de condiciones reales de campo. La compactación por impacto utilizada con el método Marshall no simula la densificación de la mezcla como ocurre en el pavimento real, y la estabilidad Marshall no estima adecuadamente la resistencia al corte del asfalto en caliente. Estas dos situaciones dificultan asegurar la resistencia al ahuellamiento

de la mezcla diseñada, lo que ha llevado a cuestionar la efectividad del método para aplicaciones modernas de pavimentación.

3.2.2. Desarrollo y Ventajas del Sistema Superpave

El término "Superpave" es un acrónimo para Superior Performing Asphalt Pavements, que evolucionó de asociaciones creadas entre la Administración Federal de Carreteras (FHWA), la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO), Junta de Investigación del Transporte (TRB) y el Programa de Investigación Estratégico de Carreteras (SHRP). El Congreso de los Estados Unidos proporcionó financiamiento adicional para este y otros programas relacionados con el transporte en 1991 a través de la Ley de Eficiencia del Transporte de Superficie Intermodal (ISTEA).

El método de diseño de mezclas Superpave fue diseñado para reemplazar los métodos Hveem y Marshall, y el sistema Superpave vincula la selección de ligante asfáltico y agregados en el proceso de diseño de mezclas, considerando también el tráfico y el clima. Los dispositivos de compactación de los procedimientos Hveem y Marshall han sido reemplazados por un compactador giratorio y el esfuerzo de compactación en el diseño de mezclas está vinculado al tráfico esperado.

Superpave es una especificación basada en desempeño para ligante asfáltico y diseño volumétrico de mezclas, con la idea de permitir diseños de pavimentos asfálticos que puedan manejar las condiciones únicas de clima y tráfico de un sitio dado en cualquier área geográfica de los Estados Unidos. El sistema consiste en tres componentes: especificación de ligante asfáltico, un sistema de clasificación basado en su respuesta de desempeño a temperaturas y características de envejecimiento, y un sistema de diseño de mezclas que integra la selección de materiales y el diseño en procedimientos unificados.

Tabla 1. Desarrollo y Ventajas del Sistema Superpave

Aspecto	Descripción	Ventaja/Beneficio
Origen	Programa SHRP (Strategic Highway Research Program) - EE.UU., años 1990. Acrónimo: Superior Performing Asphalt Pavements	Desarrollo científico respaldado por investigación federal
Financiamiento	Congreso de EE.UU. a través de ISTEA (1991). Organismos: FHWA, AASHTO, TRB	Apoyo institucional y recursos para desarrollo tecnológico
Objetivo Principal	Reemplazar métodos Hveem y Marshall con tecnología más avanzada	Mayor precisión en predicción de desempeño
Especificación de Ligante	Sistema PG (Performance Grade) basado en propiedades reológicas (DSR, BBR, DTT)	Clasificación según temperaturas de servicio reales
Diseño de Mezclas	Método volumétrico integrado con selección de materiales	Consideración simultánea de clima, tráfico y materiales
Compactación	Compactador giratorio vs. Impacto Marshall	Mejor simulación de densificación real en campo
Criterios de Tráfico	ESALs específicos del proyecto vs. genérico Marshall	Diseño adaptado a cargas reales esperadas
Evaluación Climática	Temperaturas extremas del sitio vs. no específica Marshall	Resistencia a fisuración térmica y deformación

Propiedades Evaluadas	Deformación permanente, fatiga vs. solo estabilidad Marshall	Criterios de falla más realistas y completos
Control Volumétrico	Va, VMA, VFA, $P_{0.075}/P_{\beta e}$ con criterios precisos	Mayor consistencia y control de calidad
Predicción de Desempeño	Ensayos de fluencia, tracción indirecta, sensibilidad a humedad	Estimación confiable de vida útil del pavimento
Flexibilidad de Diseño	Adaptación a condiciones específicas del proyecto	Optimización para aeropuertos, vías urbanas, climas extremos
Incorporación de Materiales Reciclados	Facilita evaluación de RAP y materiales no convencionales	Sostenibilidad ambiental y reducción de costos
Optimización de Recursos	Uso eficiente de agregados y ligante	Reducción de costos de materiales
Durabilidad	Consideración de envejecimiento (RTFO, PAV)	Pavimentos más duraderos, menor mantenimiento
Aplicabilidad Global	Adaptable a materiales regionales y condiciones locales	Implementación mundial con recursos disponibles
Costos de Ciclo de Vida	Mejor predicción reduce rehabilitaciones prematuras	Menores costos totales de infraestructura

Fuente: Autores (2025)

La Tabla 1 revela que Superpave surgió en los años 1990 como una iniciativa científica federal estadounidense respaldada por el programa SHRP (Strategic Highway Research Program), con financiamiento del Congreso a través de la Ley ISTEA (Bhatti, 2021). Este origen institucional, que involucró organismos

especializados como FHWA, AASHTO y TRB, indica que no fue un desarrollo empírico como el método Marshall, sino una respuesta sistemática y científicamente fundamentada a las limitaciones de los métodos tradicionales de diseño de pavimentos asfálticos (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

El sistema representa un cambio paradigmático fundamental en la ingeniería de pavimentos, transitando de métodos empíricos basados en parámetros indirectos hacia enfoques basados en desempeño real (Omar et al., 2021). Mientras que Marshall evalúa únicamente estabilidad y flujo como indicadores generales, Superpave evalúa directamente los mecanismos de falla específicos: deformación permanente, fatiga y fisuración térmica (Bhatti, 2021). Esta evolución metodológica permite predecir el comportamiento real del pavimento bajo condiciones específicas de servicio, proporcionando mayor confiabilidad en el diseño de infraestructuras críticas (Al-Qadi et al., 2007).

Las ventajas técnicas de Superpave se evidencian claramente en tres aspectos fundamentales (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). Primero, el compactador giratorio simula de manera más precisa la densificación real que ocurre bajo tráfico vehicular, contrastando con el martillo Marshall que genera un patrón artificial de compactación (Bhatti, 2021). Segundo, el diseño considera específicamente las condiciones del proyecto: temperaturas extremas del sitio, ESALs proyectados para la vida útil y materiales regionales disponibles (Omar et al., 2021). Tercero, los parámetros volumétricos precisos (V_a , VMA , VFA , $P_{0.075}/P_{\beta_e}$) proporcionan criterios objetivos para el control de calidad durante la construcción, reduciendo significativamente la variabilidad entre diferentes equipos de trabajo y proyectos (Al-Qadi et al., 2007).

Los beneficios económicos a largo plazo constituyen uno de los aspectos más relevantes del sistema Superpave (Riekstins et al., 2022). Aunque puede requerir mayor inversión inicial en ensayos especializados y equipos de laboratorio, genera retornos económicos sustanciales a través de menor frecuencia de rehabilitación por mejor predicción de desempeño, optimización de materiales evitando

sobrediseño o subdiseño, y reducción significativa de costos de mantenimiento debido a pavimentos más duraderos (Riekstins et al., 2022). Esta perspectiva de ciclo de vida es particularmente importante en infraestructuras aeroportuarias donde las interrupciones operacionales tienen costos económicos elevados (Jin et al., 2023).

La capacidad del sistema para facilitar la incorporación de materiales reciclados como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) y materiales no convencionales representa una ventaja crucial en el contexto actual de sostenibilidad ambiental (Al-Qadi et al., 2007; Cubas et al., 2024). Esta flexibilidad permite implementar políticas de economía circular, reducir la demanda de materiales vírgenes y adaptarse a regulaciones ambientales cada vez más estrictas, mientras mantiene estándares de desempeño elevados (Fransesqui et al., 2023).

Finalmente, la aplicabilidad global de Superpave, demostrada por su capacidad de adaptación a condiciones locales utilizando materiales regionales, pero manteniendo criterios de desempeño consistentes, confirma su superioridad metodológica (Omar et al., 2021). Esta característica es esencial para proyectos internacionales y permite la transferencia de tecnología entre diferentes regiones geográficas, consolidando Superpave como el estándar internacional para el diseño de pavimentos asfálticos de alto desempeño en aplicaciones críticas como aeropuertos, puertos y vías urbanas de alto tráfico (Khan et al., 2025; Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

3.2.3. Comparación de Eficiencia entre Metodologías

Omar et al. (2021) establecieron que ha sido probado en la literatura que el desempeño de Superpave es mejor que Marshall en términos de exposición a altas cargas y cambios severos de temperatura. Sus investigaciones demostraron que, aunque ambos métodos utilizan gradación densa, existen diferencias importantes en los puntos de control que forman los límites de gradación de agregados y las tasas de agregados de varias propiedades en el método Superpave.

Investigaciones comparativas han demostrado que mientras los vacíos de aire fueron similares entre ambos métodos, los vacíos minerales en agregado mineral (VMA) fueron significativamente menores en el método Superpave, y se estableció que el método Superpave es más preferible debido a requerir una menor cantidad de ligante. El método Superpave es universalmente aceptable ya que presta atención a parámetros como ahuellamiento y fatiga, aspectos críticos para el desempeño a largo plazo de pavimentos.

3.3. Modificación de Asfaltos con Polvo de Caucho: Desarrollos Recientes

3.3.1. Mecanismos de Interacción Asfalto-Caucho

Las rutas técnicas de preparación de asfalto modificado con caucho granulado pueden categorizarse principalmente en Asfalto-Caucho (AR) y asfalto caucho Terminal Blend (TB), basadas en los mecanismos de interacción asfalto-caucho. El AR puede producirse a 175°C-190°C, donde las partículas de caucho se hinchan continuamente en el asfalto, absorbiendo fracciones de bajo peso molecular del asfalto para formar una estructura similar a gel. La preparación de asfalto caucho TB requiere una temperatura elevada de 220°C-260°C y un tiempo de interacción más largo, llevando a la despolimerización y desvulcanización del caucho granulado.

Según ASTM D 6114, el Asfalto-Caucho se refiere a la mezcla de ligante asfáltico y caucho de neumático de desecho, donde generalmente la masa de caucho granulado de desecho en AR no es menor al 15% de la masa total, cumpliendo los requisitos de que la viscosidad aparente a 175°C no sea menor a 1500 mPa·s, y la penetración no sea menor a 25 mm. En teoría, agregar materiales de caucho de desecho a la mezcla asfáltica puede mejorar sus propiedades de amortiguamiento, mientras que las mezclas asfálticas porosas tienen buenas propiedades de absorción de sonido debido a sus grandes vacíos de aire.

3.3.2. Tecnologías de Reducción de Viscosidad

La viscosidad del ligante asfáltico de alta densidad ha sido muy alta, y la adición de caucho granulado continuará aumentando la viscosidad, lo que aumenta significativamente la dificultad de construcción y compactación. La tecnología de reducción de viscosidad se considera un medio efectivo para reducir la viscosidad del ligante asfáltico, donde los agentes reductores de viscosidad pueden reducir la temperatura de mezclado o compactación de mezclas asfálticas en 15-30°C.

Las investigaciones recientes han demostrado que diferentes tecnologías de reducción de viscosidad tienen efectos distintos en el desempeño vial y de reducción de ruido del pavimento asfáltico. Para pavimentos de reducción de ruido, es crucial elegir una tecnología de reducción de viscosidad adecuada que mantenga tanto las propiedades mecánicas como las características acústicas deseadas.

3.3.3. Aspectos Ambientales y de Sostenibilidad

La reutilización de materiales de desecho y agregados residuales, así como la reducción de emisiones, se ha vuelto vitalmente importante para el medio ambiente, la economía y la logística de la industria de pavimentación asfáltica. Los estudios recientes caracterizan el desempeño y las propiedades de producción de mezclas asfálticas con modificador de caucho granulado de desecho de neumáticos, aditivo surfactante de mezcla asfáltica tibia y agregados volcánicos residuales de baja calidad como el único componente mineral.

Existe preocupación sobre la potencial toxicidad del betún y materiales reciclados como pavimentos asfálticos recuperados de carreteras al final de su vida útil y caucho granulado de neumáticos de desecho. El caucho granulado se produce a partir de una variedad de neumáticos de desecho y puede contener una amplia gama de metales (por ejemplo, Cu, Co, Fe y Zn) y químicos utilizados como estabilizadores y aditivos, lo que requiere medidas de protección estrictas en los procedimientos técnicos.

3.4. Pavimentos Aeroportuarios: Requerimientos Especializados

3.4.1. Condiciones Operacionales Críticas

Los pavimentos aeroportuarios representan uno de los tipos de infraestructura más exigentes en términos de cargas y condiciones operacionales. El principal componente del área de movimiento de un aeropuerto son sus pistas de aterrizaje, las cuales deben conservarse en condiciones óptimas para el despegue y aterrizaje de aeronaves, siendo de vital importancia tener conocimiento del estado actual en el que se encuentra operando.

Las cargas generadas por aeronaves comerciales superan significativamente las de vehículos terrestres convencionales, no solo en magnitud sino también en la frecuencia y naturaleza de aplicación. Las fallas en pavimentos aeroportuarios son indicadores externos del deterioro del pavimento causado por carga, condiciones ambientales y deficiencias en la construcción, lo que requiere sistemas de monitoreo y mantenimiento más rigurosos que los pavimentos viales convencionales.

Las condiciones operacionales críticas en pavimentos aeroportuarios representan un conjunto de desafíos únicos que los diferencian fundamentalmente de cualquier otro tipo de infraestructura vial (Jin et al., 2023). La infografía revela que estas condiciones se estructuran en cuatro categorías principales que interactúan sinérgicamente para crear un ambiente operacional extremadamente exigente (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Esta complejidad operacional justifica la necesidad de metodologías de diseño avanzadas y la evaluación rigurosa de materiales modificados en aplicaciones aeroportuarias (Khan et al., 2025).

Las cargas extremas constituyen el primer factor crítico, caracterizándose por magnitudes que superan considerablemente las generadas por vehículos terrestres convencionales (Omar et al., 2021). Las aeronaves comerciales modernas pueden

generar cargas estáticas superiores a 300 toneladas, concentradas en áreas relativamente pequeñas a través de los sistemas de aterrizaje (Bhatti, 2021).

Figura 1. *Condiciones Operacionales Críticas*



Fuente: Autores (2025)

Estas cargas no solo son elevadas en magnitud, sino que se aplican de manera cíclica y repetitiva, creando condiciones de fatiga acelerada en los materiales del pavimento (Yazdipanah et al., 2021). Adicionalmente, los impactos durante aterrizajes y las fuerzas de frenado intenso generan esfuerzos dinámicos complejos

que deben ser considerados en el diseño estructural de las mezclas asfálticas (Al-Qadi et al., 2007).

Las condiciones ambientales representan el segundo desafío crítico, exponiendo los pavimentos aeroportuarios a un rango térmico extremo que puede oscilar entre -40°C y $+70^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la ubicación geográfica y las condiciones climáticas locales (Wang et al., 2023). Esta exposición se ve agravada por la ausencia total de protección contra elementos climáticos adversos, contrastando con pavimentos urbanos que pueden beneficiarse de sombra o protección parcial (Jin et al., 2023). La radiación UV intensa, los ciclos de hielo-deshielo, las precipitaciones intensas y las variaciones térmicas abruptas aceleran los procesos de envejecimiento del asfalto y pueden comprometer la integridad estructural del pavimento si no se consideran adecuadamente en el diseño de la mezcla (Hajikarimi et al., 2022).

La demanda de operaciones continuas constituye el tercer factor crítico, requiriendo que los pavimentos aeroportuarios mantengan su funcionalidad las 24 horas del día, los 7 días de la semana, sin interrupciones significativas para mantenimiento (Omar et al., 2021). Esta exigencia operacional demanda materiales con alta resistencia a la fatiga, capacidad de recuperación elástica y durabilidad excepcional (Yazdipanah et al., 2021). A diferencia de las vías urbanas donde es posible programar cierres temporales para mantenimiento, los pavimentos aeroportuarios deben mantener su disponibilidad operacional de manera prácticamente ininterrumpida, lo que requiere diseños conservadores pero eficientes que minimicen la necesidad de intervenciones correctivas (Riekstins et al., 2022).

La relevancia de seguridad representa el factor más determinante en el diseño de pavimentos aeroportuarios, estableciendo una tolerancia prácticamente nula a fallas estructurales o funcionales (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Cualquier deterioro significativo en el pavimento puede comprometer la seguridad operacional de las aeronaves, generando riesgos inaceptables para pasajeros, tripulaciones y operaciones aeroportuarias (Jin et al., 2023). Esta severidad se

traduce en costos económicos elevados cuando se presentan interrupciones operacionales, ya que el cierre temporal de pistas o plataformas genera pérdidas económicas sustanciales tanto para el aeropuerto como para las aerolíneas (Riekstins et al., 2022). Consecuentemente, las normativas aplicables son extremadamente estrictas y requieren inspecciones regulares obligatorias para garantizar el mantenimiento de estándares de seguridad (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

La interacción sinérgica de estos cuatro factores críticos crea un ambiente operacional que demanda enfoques de diseño especializado, como el método Superpave, que considera simultáneamente las condiciones climáticas extremas, las cargas de tráfico específicas y las propiedades reológicas avanzadas de los ligantes asfálticos (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). En este contexto, la incorporación de materiales modificados como el polvo de caucho reciclado debe ser evaluada no solo por sus beneficios ambientales, sino también por su capacidad de mantener o mejorar el desempeño estructural bajo estas condiciones operacionales críticas, garantizando la seguridad operacional y la viabilidad económica de infraestructuras aeroportuarias estratégicas como el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Cubas et al., 2024; Franesqui et al., 2023).

3.4.2. Metodologías de Evaluación Especializadas

La metodología PCI (índice de condición del pavimento) describe la integridad estructural y la condición operativa de los pavimentos aeroportuarios, y su determinación se basa en la identificación y evaluación del nivel de severidad, brindando una calificación que varía de 0 (colapsado) a 100 (excelente) según la condición del pavimento. Esta metodología es específicamente adaptada para las condiciones particulares de pavimentos aeroportuarios.

Los estudios de caso han demostrado la efectividad de estas metodologías. En el Aeropuerto Alférez FAP David Figuroa Fernandini de Huánuco, los resultados arrojaron un PCI promedio de 62, valor que cuantifica el estado de conservación bueno en que se encuentra el pavimento, recomendándose realizar una

rehabilitación de la pista de aterrizaje. Estos resultados resaltan la importancia de evaluaciones periódicas cada 6 o 12 meses para llevar el control del estado del pavimento.

La evaluación de pavimentos aeroportuarios requiere consideraciones especiales debido a la calidad que deben tener estas infraestructuras. Los ensayos de mecánica de suelos y de la carpeta asfáltica deben cumplir con especificaciones establecidas por la FAA, y cualquier deterioro debe ser documentado y analizado para determinar las causas y establecer estrategias de intervención apropiadas. La implementación de programas de gestión de mantenimiento preventivo es fundamental para garantizar la seguridad operacional y optimizar los costos de ciclo de vida de estas infraestructuras.

3.4.3. Innovaciones en Materiales para Pavimentos Aeroportuarios

Las investigaciones recientes han explorado la aplicación de materiales modificados en pavimentos aeroportuarios con resultados prometedores. La incorporación de polvo de caucho en mezclas asfálticas para aplicaciones aeroportuarias presenta desafíos únicos relacionados con los requisitos de resistencia a cargas pesadas y la necesidad de mantener propiedades de superficie específicas para la operación segura de aeronaves.

Los estudios de ruido han demostrado que las mezclas modificadas con caucho pueden proporcionar beneficios adicionales en términos de reducción de ruido aeroportuario, un aspecto cada vez más importante debido a las regulaciones ambientales y las preocupaciones de las comunidades cercanas a los aeropuertos. Jin et al. (2023) reportaron reducciones de ruido superiores al 50% en energía acústica a velocidades de diseño, lo que sugiere aplicabilidad potencial en áreas aeroportuarias donde el control de ruido es crítico.

3.5. Marco Normativo Actualizado

3.5.1. Normativas Internacionales Recientes

Las normativas ASTM han sido actualizadas para incluir métodos específicos para agregados de asfaltos y concretos reciclados, incluyendo ASTM D2419-22 para el valor equivalente de arena de suelos y agregados finos, ASTM C1252-23 para el contenido de vacíos no compactados de agregado fino, y ASTM C127-24 para densidad y gravedad específica de agregado grueso. Estas actualizaciones reflejan la creciente importancia de la caracterización precisa de materiales reciclados en aplicaciones de pavimentación.

Las especificaciones AASHTO han incorporado criterios específicos para la evaluación de mezclas que contienen asfaltos y concretos reciclados, estableciendo procedimientos de ensayo que consideran las particularidades de estos materiales. AASHTO T-330 proporciona métodos estandarizados para la detección cualitativa de arcillas dañinas del grupo esmectita en agregados usando azul de metileno, mientras que AASHTO M 323 detalla los criterios de selección para ligantes PG, requisitos de agregados combinados y diseño de mezclas.

3.5.2. Especificaciones para Materiales Modificados

Las especificaciones para asfaltos modificados con caucho han sido refinadas, estableciendo que la masa de caucho granulado de desecho en Asfalto-Caucho no debe ser menor al 15% de la masa total, con requisitos específicos de viscosidad aparente a 175°C no menor a 1500 mPa·s y penetración no menor a 25 mm según ASTM D 6114. Estas especificaciones proporcionan un marco técnico claro para la implementación de tecnologías de modificación con caucho en proyectos de infraestructura.

Las normativas actualizadas también incluyen procedimientos específicos para el control de calidad durante la producción y colocación de mezclas modificadas. ASTM D5/D5M-20 establece métodos estándar para la penetración de materiales

bituminosos, ASTM D113/D113M-17 para la ductilidad de materiales asfálticos, y ASTM D2170/D2170M-24 para la viscosidad cinemática de asfaltos, proporcionando herramientas completas para la caracterización de ligantes modificados.

3.5.3. Marcos Regulatorios para Aplicaciones Aeroportuarias

La evolución normativa también incluye aspectos ambientales y de sostenibilidad específicos para aplicaciones aeroportuarias. Las nuevas directrices enfatizan la importancia de tecnologías limpias que combinen la reutilización de agregados residuales, caucho granulado de desecho y aditivos de mezcla asfáltica tibia, estableciendo un marco integral para la implementación de soluciones sostenibles en pavimentación aeroportuaria.

Los estándares de la FAA (Federal Aviation Administration) han sido complementados con consideraciones para materiales reciclados, estableciendo criterios de desempeño que deben cumplir las mezclas modificadas para su uso en pavimentos aeroportuarios. Estos criterios incluyen requisitos específicos de resistencia a la deformación permanente, resistencia a la fatiga y durabilidad bajo condiciones de carga repetitiva de alta magnitud.

Las normativas INEN en Ecuador han incorporado progresivamente estándares internacionales para materiales modificados, proporcionando el marco normativo nacional para la implementación de tecnologías innovadoras en pavimentación. Esto incluye procedimientos para la caracterización de materiales locales y criterios de aceptación adaptados a las condiciones climáticas y de tráfico específicas del país.

3.6. Tendencias Futuras y Direcciones de Investigación

3.6.1. Tecnologías Emergentes en Modificación de Asfaltos

Las investigaciones más recientes han explorado tecnologías avanzadas para la activación y procesamiento del caucho reciclado. Wu et al. (2024) desarrollaron

técnicas de activación por microondas para caucho granulado, demostrando mejoras significativas en las propiedades térmicas y reológicas de los ligantes modificados. Esta tecnología representa un avance importante en la optimización de la interacción asfalto-caucho, potencialmente aplicable a condiciones de alta exigencia como las presentes en pavimentos aeroportuarios.

Simon et al. (2020) investigaron la desvulcanización de caucho molido de neumáticos mediante enfoques de microondas y termomecánicos, estableciendo que estos métodos pueden mejorar significativamente la compatibilidad del caucho con los ligantes asfálticos. Sus hallazgos sugieren que la optimización de los procesos de desvulcanización puede conducir a mezclas con propiedades mecánicas superiores y mayor durabilidad.

3.6.2. Integración de Múltiples Materiales Reciclados

La tendencia hacia la sostenibilidad ha impulsado investigaciones sobre la combinación de múltiples materiales reciclados en mezclas asfálticas. Yazdipناه et al. (2021) investigaron la resistencia al ahuellamiento y fatiga de mezclas asfálticas que contienen caucho granulado y aditivos de mezcla asfáltica tibia a base de cera, estableciendo que la combinación sinérgica de estos materiales puede producir mejoras superiores a las obtenidas con cada material individualmente.

Nanjegowda y Biligiri (2023) desarrollaron ligantes de asfalto-caucho modificado utilizando altos contenidos de caucho granulado de neumáticos reciclados para aplicaciones viales, demostrando que es posible incorporar cantidades significativas de material reciclado manteniendo o mejorando las propiedades de desempeño. Sus investigaciones contribuyen al desarrollo de tecnologías que maximizan la utilización de residuos mientras optimizan el desempeño estructural.

3.6.3. Modelado Predictivo y Caracterización Avanzada

El desarrollo de herramientas de modelado predictivo representa una frontera importante en la investigación de materiales asfálticos modificados. Los modelos

numéricos avanzados están siendo desarrollados para predecir el comportamiento a largo plazo de mezclas modificadas bajo condiciones específicas de carga y clima, facilitando la optimización de formulaciones para aplicaciones especializadas como pavimentos aeroportuarios.

La caracterización multiescala de materiales modificados está proporcionando detalles fundamentales sobre los mecanismos de mejora de propiedades. Estos avances en caracterización están facilitando el desarrollo de especificaciones basadas en desempeño más precisas y la optimización de procesos de producción para maximizar los beneficios de la modificación con caucho.

4. Materiales y Metodología

4.1. Metodología

4.1.1. Nivel de Investigación

La presente investigación se basa en un enfoque experimental, ya que es requerida la realización de ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades mecánicas y físicas de los materiales pétreos y del asfalto, así como la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con residuos de caucho de llantas de avión que pasan el tamiz No. 50. Estos ensayos nos permitirán establecer comparaciones entre los resultados obtenidos por medio de las metodologías de diseño Marshall y Superpave, con la finalidad de evaluar su comportamiento y desempeño bajo condiciones de carga similares a las del campo.

Este trabajo se lo clasifica como una investigación aplicada, ya que busca resolver una problemática específica del ámbito de la ingeniería vial, la cual se trata de mejorar el diseño y desempeño de mezclas asfálticas mediante la incorporación de residuos de caucho creando así una alternativa sostenible. A través de la aplicación de métodos estandarizados como Marshall y Superpave, los resultados de los ensayos nos servirán como base para la comparación del comportamiento mecánico de las mezclas y la validación de su aplicabilidad en obras viales.

4.1.2. Población y Muestra

El estudio tiene por finalidad realizar el análisis de mezclas asfálticas compactadas, briquetas. Para determinar el contenido óptimo de asfalto utilizando el método Marshall se han fabricado 15 muestras, de las cuales el porcentaje de asfalto varía con los siguientes valores: 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7%, cabe aclarar que para cada una de ellas el porcentaje de caucho reciclado es el mismo, 1.5%.

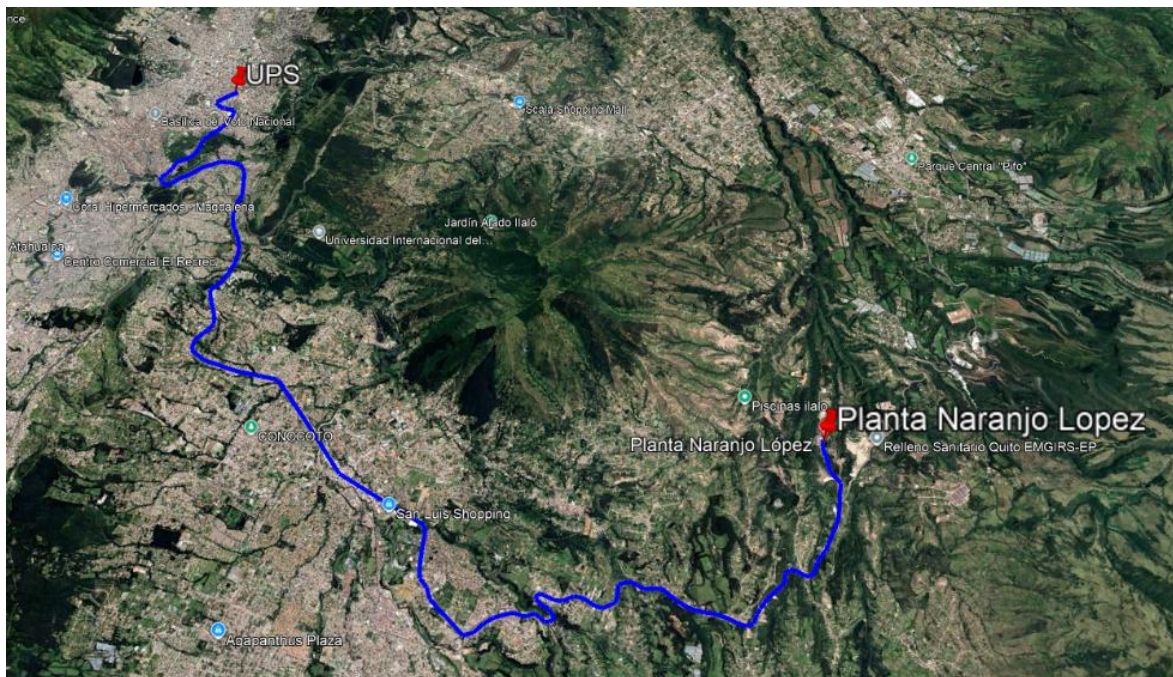
En el método Superpave se calculó el porcentaje óptimo de asfalto del 6%. Con este porcentaje procedimos a la elaboración de tres núcleos siguiendo las especificaciones correspondientes.

Cabe mencionar que el presente estudio tiene un enfoque comparativo entre dos metodologías de diseño, por lo que se optó por realizar los ensayos del método Superpave solo en 3 núcleos con el porcentaje óptimo de asfalto.

4.2. Datos de los Materiales

Los materiales ocupados en este proyecto investigativo fueron obtenidos de la planta Naranjo López ubicado en la ciudad de Quito. Los materiales que se ocupamos son: agregados gruesos con TNM de 3/4", agregados medios con TNM 1/2", al igual que asfalto AC-20 y residuos de llanta de caucho de avión que pasan por el tamiz No. 50.

Figura 2. Ubicación de la Planta Naranjo López



Fuente: Google Earth (2025)

4.2.1. Agregados Pétreos

Los agregados pétreos al igual que el asfalto AC-20 son provenientes de la Planta Naranjo López, estos agregados son los utilizados en la elaboración y diseño de mezcla asfáltica en el presente proyecto.

4.2.2. Cemento Asfáltico Y PCR

El ligante asfáltico utilizado es el denominado AC-20, se caracteriza por su alta resistencia al envejecimiento térmico y a la deformación permanente, lo cual lo hace ideal para tráfico pesado. Este asfalto es producido por EP Petroecuador y fue obtenido en la planta Naranjo López, el mismo que no se ha colocado ningún aditivo para ser analizado en su forma base, sin embargo, se los puede utilizar dependiendo su análisis y la mejora que se le requiera dar a las propiedades específicas que el asfalto base no las proporciona tales como el aumento a la resistencia al agrietamiento térmico, incremento de la durabilidad y resistencia al envejecimiento, entre otras.

El polvo de caucho o PCR fue obtenido gracias a las iniciativas empleadas por el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, ubicado en Tababela, al este de Quito, este caucho a ser utilizado proviene del residuo que las llantas de las aeronaves dejan en la pista durante el aterrizaje y frenado.

4.3. Ensayos para Caracterización de Materiales

Para poder realizar el diseño de una mezcla asfáltica en caliente siempre es necesario caracterizar los materiales que lo conforman, esto con el propósito de cumplir con las normas establecidas tanto nacionalmente como internacionalmente.

La caracterización física de los agregados pétreos y del ligante asfáltico se realizó con base en propiedades definidas por su origen y por su consenso técnico, siempre siguiendo los parámetros establecidos en las normas INEN, AASHTO y ASTM, al igual que las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F 2002. Los resultados obtenidos se presentan en tablas y gráficos, según corresponda para facilitar su interpretación y análisis.

La demanda de operaciones continuas constituye el tercer factor crítico, requiriendo que los pavimentos aeroportuarios mantengan su funcionalidad las 24 horas del día, los 7 días de la semana, sin interrupciones significativas para mantenimiento (Omar et al., 2021). Esta exigencia operacional demanda materiales con alta resistencia a la fatiga, capacidad de recuperación elástica y durabilidad excepcional (Yazdipanah et al., 2021). A diferencia

de las vías urbanas donde es posible programar cierres temporales para mantenimiento, los pavimentos aeroportuarios deben mantener su disponibilidad operacional de manera prácticamente ininterrumpida, lo que requiere diseños conservadores pero eficientes que minimicen la necesidad de intervenciones correctivas (Riekstins et al., 2022).

Esta demanda operacional continua se ve intensificada por el crecimiento exponencial del tráfico aéreo mundial, que ha experimentado un aumento sostenido en las últimas décadas, incrementando la frecuencia de movimientos de aeronaves y reduciendo las ventanas de tiempo disponibles para mantenimiento preventivo (Leong et al., 2023). Los aeropuertos internacionales principales, como el Mariscal Sucre, operan con cronogramas de vuelos extremadamente ajustados, donde cualquier retraso por mantenimiento de pistas genera efectos en cascada que afectan múltiples operaciones y conexiones (Jin et al., 2023). La programación de mantenimiento debe coordinarse con anticipación considerable, a menudo limitándose a ventanas nocturnas de pocas horas, durante las cuales deben completarse inspecciones, reparaciones menores y labores de limpieza especializadas (Fransqui et al., 2022).

Además, las condiciones operacionales continuas exigen que los materiales del pavimento mantengan sus propiedades mecánicas bajo ciclos de carga repetitivos de alta magnitud, sin experimentar deterioro significativo que comprometa la rugosidad superficial, la resistencia al deslizamiento o la capacidad de drenaje superficial (Wu et al., 2024). La incorporación de materiales modificados como el polvo de caucho reciclado debe demostrar no solo compatibilidad con estas exigencias, sino también contribuir a la mejora de la resistencia a la fatiga y la capacidad de recuperación elástica del pavimento, características fundamentales para soportar operaciones aeroportuarias intensivas sin degradación prematura (Nanjegowda & Biligiri, 2023).

El grado de seguridad representa el factor más determinante en el diseño de pavimentos aeroportuarios, estableciendo una tolerancia prácticamente nula a fallas estructurales o funcionales (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Cualquier deterioro significativo en el pavimento puede comprometer la seguridad operacional de las aeronaves, generando riesgos inaceptables para pasajeros, tripulaciones y operaciones

aeroportuarias (Jin et al., 2023). Esta ineficiencia se traduce en costos económicos elevados cuando se presentan interrupciones operacionales, ya que el cierre temporal de pistas o plataformas genera pérdidas económicas sustanciales tanto para el aeropuerto como para las aerolíneas (Riekstins et al., 2022). Consecuentemente, las normativas aplicables son extremadamente estrictas y requieren inspecciones regulares obligatorias para garantizar el mantenimiento de estándares de seguridad (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

Los estándares de seguridad aeroportuaria están regulados por organismos internacionales como la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y la Administración Federal de Aviación (FAA), que establecen criterios específicos para la integridad estructural de pavimentos, incluyendo límites estrictos para deformaciones superficiales, fisuramiento, desprendimiento de materiales y variaciones en la rugosidad que puedan afectar las operaciones de aterrizaje y despegue (Kim et al., 2010). Estos criterios son significativamente más restrictivos que los aplicables a pavimentos viales convencionales, ya que las aeronaves operan a velocidades superiores y requieren superficies con características de fricción y uniformidad específicas para garantizar el control direccional durante maniobras críticas (Simon et al., 2020).

La evaluación de los criterios de seguridad también incluye consideraciones sobre la resistencia al derrame de combustibles de aviación, que pueden degradar químicamente los materiales asfálticos si no se diseñan adecuadamente (Farina et al., 2024). Los pavimentos aeroportuarios deben resistir la exposición a hidrocarburos aromáticos, aditivos antihielos y otros fluidos operacionales sin experimentar hinchamiento, pérdida de cohesión o deterioro de sus propiedades mecánicas (Hajikarimi et al., 2022). En este contexto, la incorporación de polvo de caucho reciclado debe evaluarse considerando no solo su compatibilidad química con estos agentes, sino también su capacidad de mantener la integridad estructural del pavimento bajo exposición prolongada a contaminantes operacionales (Yu et al., 2022).

La interacción sinérgica de estos cuatro factores críticos crea un ambiente operacional que demanda enfoques de diseño especializado, como el método Superpave, que

considera simultáneamente las condiciones climáticas extremas, las cargas de tráfico específicas y las propiedades reológicas avanzadas de los ligantes asfálticos (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). En este contexto, la incorporación de materiales modificados como el polvo de caucho reciclado debe ser evaluada no solo por sus beneficios ambientales, sino también por su capacidad de mantener o mejorar el desempeño estructural bajo estas condiciones operacionales críticas, garantizando la seguridad operacional y la viabilidad económica de infraestructuras aeroportuarias estratégicas como el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Cubas et al., 2024; Franesqui et al., 2023).

Esta complejidad operacional requiere un enfoque integral de diseño que incorpore análisis de ciclo de vida, evaluación de riesgos operacionales y modelado predictivo del comportamiento a largo plazo de las mezclas modificadas (Wang et al., 2023). Los métodos tradicionales como Marshall resultan insuficientes para capturar esta complejidad, mientras que Superpave proporciona herramientas analíticas más robustas para evaluar el desempeño bajo condiciones extremas, incluyendo ensayos de módulo dinámico que simulan las condiciones reales de carga y temperatura que experimentan los pavimentos aeroportuarios (Bhatti, 2021). La validación de mezclas modificadas con PCR debe incluir no solo la caracterización en laboratorio, sino también la implementación de tramos piloto que permitan verificar el comportamiento bajo condiciones operacionales reales, proporcionando datos fundamentales para la toma de decisiones técnicas en proyectos de infraestructura crítica (Instituto del Asfalto, 2009).

4.3.1. Agregados Pétreos

Los agregados para utilizarse deben cumplir ciertas especificaciones detalladas en el MTOP-001F 2002, como lo son: granulometría, gravedad específica, equivalente de arena, desgaste por abrasión, las tablas siguientes detallarán los resultados de dichos ensayos.

4.3.1.1 Análisis Granulométrico (ASTM C136, NTE INEN 0696:2011)

El análisis granulométrico constituye uno de los ensayos fundamentales en la caracterización de agregados pétreos para mezclas asfálticas, permitiendo determinar la distribución del tamaño de las partículas mediante la técnica del tamizado progresivo

(Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Este procedimiento, normalizado bajo las especificaciones ASTM C136 y NTE INEN 0696:2011, proporciona información esencial sobre la composición granular de los agregados, factor determinante en las propiedades volumétricas, mecánicas y de trabajabilidad de las mezclas asfálticas resultantes (Instituto del Asfalto, 2009).

La metodología del ensayo requiere una muestra representativa de agregado que se hace pasar a través de una serie de tamices con aberturas que disminuyen progresivamente, desde tamices de mayor abertura hasta el tamiz No. 200 (0.075 mm). Durante este proceso, se registra meticulosamente la cantidad de material retenido en cada tamiz, lo que permite calcular el porcentaje acumulado que pasa por cada abertura específica (ASTM C136, 2019). Esta información se utiliza para construir curvas granulométricas que deben cumplir con los rangos especificados en las normativas técnicas aplicables, garantizando así la calidad y uniformidad de los agregados utilizados en la construcción de pavimentos (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

En el presente estudio, el análisis granulométrico se aplicó a tres tipos de agregados: grueso (3/4"), intermedio (1/2") y fino (arena), conforme a los procedimientos establecidos en las normativas ASTM C136 y NTE INEN 0696:2011. Los resultados obtenidos se presentaron en formato tabular, registrando el peso retenido en cada tamiz, el peso retenido acumulado y el porcentaje que pasa cada abertura. Esta información permitió verificar que cada fracción de agregado cumple con los límites granulométricos establecidos por la especificación MOP-001-F-2002 para mezclas asfálticas en planta, asegurando la conformidad técnica de los materiales utilizados (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

La representación gráfica de los resultados granulométricos mediante curvas permite una interpretación visual inmediata del comportamiento de cada agregado y su adecuación a los límites normativos. Estas curvas granulométricas son fundamentales para el diseño de la mezcla combinada, donde se determina la proporción óptima de cada tipo de agregado para obtener una graduación que se mantenga dentro de la faja granulométrica especificada (Al-Qadi et al., 2007). La graduación combinada resultante

debe considerar no solo el cumplimiento de límites normativos, sino también la optimización de propiedades como trabajabilidad, estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica final, aspectos particularmente relevantes cuando se incorporan materiales modificadores como el PCR en aplicaciones de gran significancia como pavimentos aeroportuarios (Jin et al., 2023).

Ayuda a determinar la distribución del tamaño de las partículas de los agregados de distinto orden (fino, intermedio y grueso) haciendo uso de la técnica del tamizado. Se necesita una cantidad representativa de agregado a la cual se la hace pasar por los tamices con aberturas que van disminuyendo progresivamente. A medida que avanza el procedimiento, se registra la cantidad de material retenido, con la finalidad de calcular el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, los resultados de los ensayos para los distintos tipos de agregados están detallados en las Tablas 1, 2 y 3.

Figura 3. Colocación de Material en los Tamices para el Ensayo de Granulometría



Fuente: Autores (2025)

Figura 4. Ensayo de Granulometría – Manual



Fuente: Autores (2025)

Figura 5. Medición de Peso Después del Tamizado

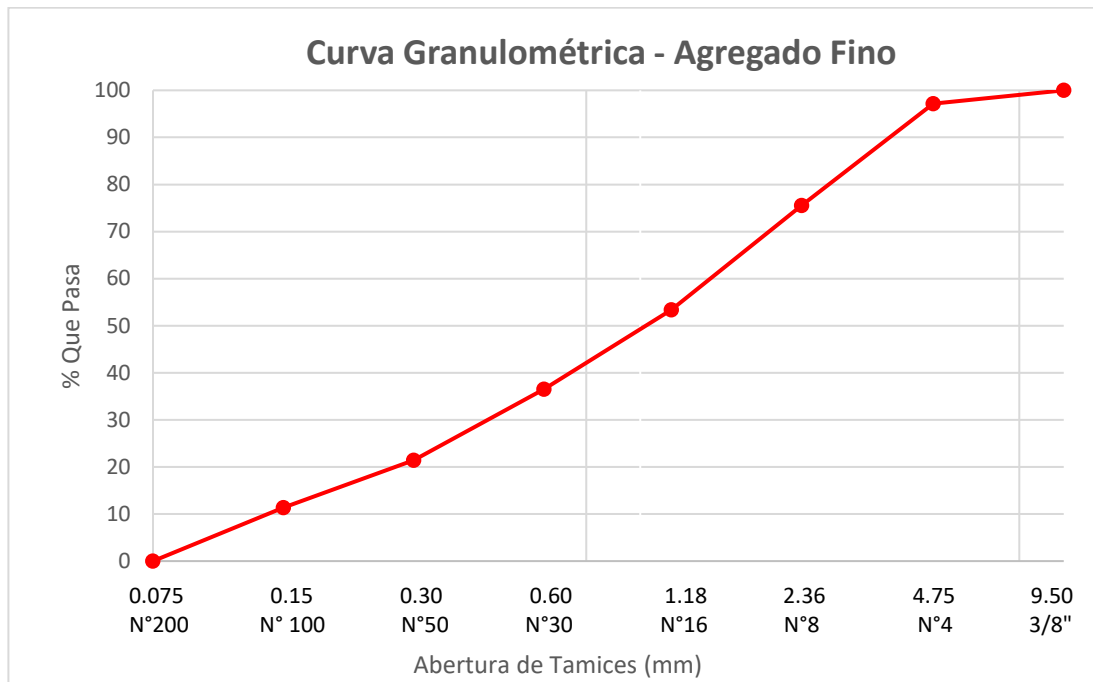


Fuente: Autores (2025)

Tabla 2. Granulometría de Agregado Fino (Arena)

Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido	% Que pasa
N°4 (4.75 mm)	32	32	2.473	97.527
N°8 (2.36 mm)	244	276	18.856	78.671
N°16 (1.18 mm)	250	526	19.320	59.351
N°30 (0.60 mm)	190	716	14.683	44.668
N°50 (0.30 mm)	170	886	13.138	31.530
N°100 (0.15 mm)	114	1000	8.810	22.720
N°200 (0.075 mm)	128	1128	9.892	12.828
Fondo	104	1232	8.037	4.791

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 1. Curva Granulométrica – Agregado Fino

Fuente: Autores (2025)

La Tabla 2 granulométrica del agregado fino revela características técnicas específicas que determinan su idoneidad para la formulación de mezclas asfálticas de alto desempeño. El análisis detallado de la distribución de tamaños de partículas proporciona información sobre el comportamiento esperado de este material como componente de la fracción fina en la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho reciclado (Bhatti, 2021).

La ausencia total de material retenido en tamices superiores al No. 4 (desde 3" hasta 3/8") confirma que el agregado cumple con la definición técnica de agregado fino, donde el 100% del material pasa por el tamiz de 3/8" (9.50 mm). Esta característica es fundamental para garantizar la homogeneidad de la mezcla y evitar segregación durante los procesos de manejo, transporte y colocación (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). La clasificación correcta del material como agregado fino es esencial para el diseño volumétrico de la mezcla, ya que influye directamente en parámetros como la superficie específica disponible para el recubrimiento con ligante asfáltico y la densidad de empaquetamiento de las partículas (Omar et al., 2021).

El comportamiento granulométrico en la zona de tamices intermedios (No. 4 a No. 30) muestra una distribución gradual y bien proporcionada. El tamiz No. 4 retiene únicamente 2.473% del material, indicando que la fracción gruesa dentro del agregado fino es mínima, lo cual favorece la trabajabilidad de la mezcla. La progresión a través de los tamices No. 8 (18.856% retenido), No. 16 (19.320% retenido) y No. 30 (14.683% retenido) evidencia una distribución equilibrada en las fracciones medias, característica deseable para obtener una graduación densa que minimice los vacíos intergranulares y optimice la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

La zona de tamices finos (No. 50 a No. 200) presenta características técnicas relevantes para la incorporación del polvo de caucho reciclado como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50. El análisis revela que 31.530% del material pasa el tamiz No. 50 (0.30 mm), proporción que constituye la fracción objetivo para el reemplazo con PCR al 1.5% del total de la mezcla. Esta fracción incluye partículas de tamaño similar al PCR procesado, facilitando la integración homogénea del material reciclado sin alterar significativamente la estructura granular de la mezcla (Leong et al., 2023).

El contenido de finos, representado por el material que pasa el tamiz No. 200 (12.828%) y el material de fondo (4.791%), indica una cantidad moderada de partículas arcillosas y limosas. Esta proporción es técnicamente aceptable según las especificaciones MOP-001-F-2002, pero requiere verificación mediante el ensayo de equivalente de arena para confirmar la calidad de estos finos (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Un contenido adecuado de finos contribuye a la cohesión de la mezcla y facilita la compactación, pero concentraciones excesivas pueden incrementar la demanda de ligante asfáltico y afectar la durabilidad del pavimento (Al-Qadi et al., 2007).

La curva granulométrica resultante sugiere una graduación bien distribuida que favorece la obtención de una mezcla densa con buenas propiedades de empaquetamiento. Esta característica es particularmente importante en aplicaciones aeroportuarias donde se requiere alta resistencia a la deformación permanente bajo cargas pesadas y repetitivas (Jin et al., 2023). La distribución granulométrica observada proporciona una base sólida

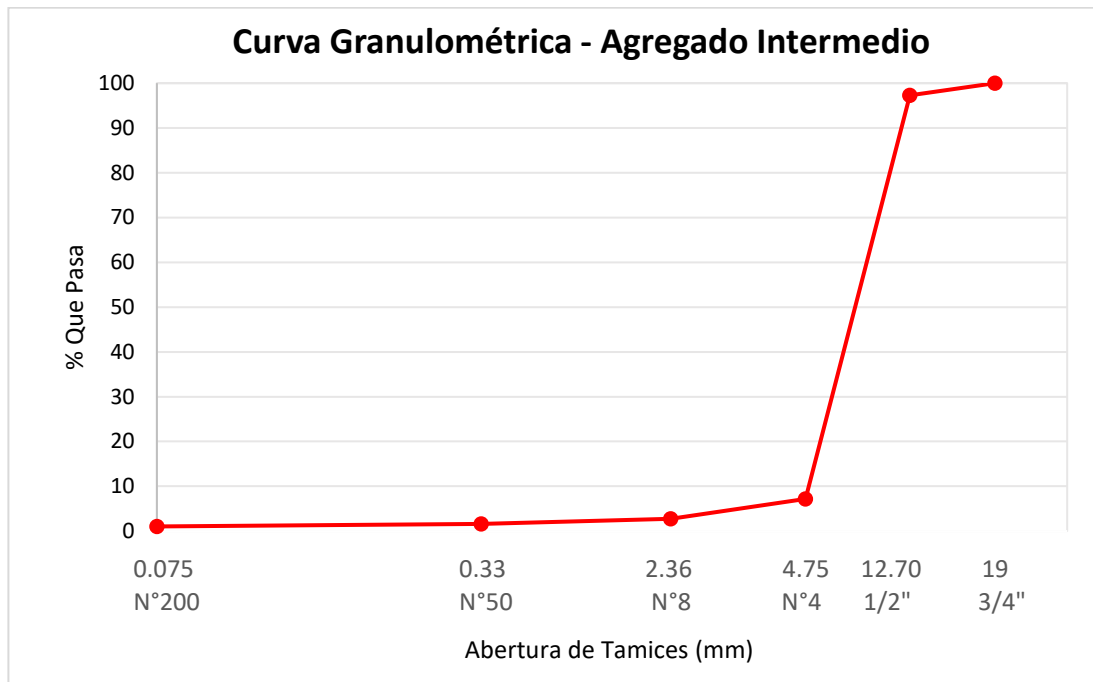
para la incorporación del PCR, ya que permite mantener la continuidad granular mientras se introduce el material modificador en la fracción fina de la mezcla.

Desde la perspectiva del diseño de mezclas asfálticas modificadas, esta granulometría ofrece ventajas técnicas específicas para la integración del polvo de caucho reciclado. La presencia de una fracción significativa de material fino (31.530% pasante del tamiz No. 50) proporciona suficiente material base para el reemplazo parcial con PCR, mientras que la distribución equilibrada en tamices intermedios garantiza el mantenimiento de la estructura granular y las propiedades mecánicas de la mezcla (Cubas et al., 2024). Esta compatibilidad granulométrica es esencial para asegurar que la incorporación del PCR no comprometa el desempeño estructural de la mezcla asfáltica en aplicaciones críticas como pavimentos aeroportuarios, donde la seguridad operacional y la durabilidad a largo plazo son requisitos ineludibles (Fransqui et al., 2023).

Tabla 3. *Granulometría Agregado Intermedio*

Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido	% Que pasa
1/2"	184	184	-	100
3/8"	1474	1658	-	100
N°4 (4.75 mm)	4638	6296	68.266	31.734
N°8 (2.36 mm)	302	6598	4.445	2.885
N°16 (1.18 mm)	40	6638	0.589	2.296
N°30 (0.60 mm)	22	6660	0.324	1.972
N°50 (0.30 mm)	16	6676	0.236	1.737
N°100 (0.15 mm)	10	6686	0.147	1.590
N°200 (0.075 mm)	28	6714	0.412	1.178
Fondo	70	6784	1.030	0.147

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 2. Curva Granulométrica – Agregado Intermedio

Fuente: Autores (2025)

La granulometría del agregado intermedio presenta características técnicas distintivas que lo clasifican apropiadamente dentro de la fracción de tamaño nominal máximo de 1/2" (12.70 mm), evidenciando un perfil granulométrico concentrado principalmente en las fracciones gruesas con distribución controlada hacia los tamices finos (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Este comportamiento granulométrico es fundamental para proporcionar la estructura esquelética de la mezcla asfáltica, contribuyendo significativamente a la resistencia mecánica y estabilidad dimensional del pavimento bajo condiciones de carga aeroportuaria (Omar et al., 2021).

El análisis de los tamices superiores confirma la correcta clasificación del material, donde el 100% pasa los tamices desde 3" hasta 3/4", con retenciones iniciales en el tamiz 1/2" (184 g) y 3/8" (1474 g), representando las fracciones más gruesas del agregado intermedio. Esta distribución inicial es técnicamente adecuada ya que establece el límite superior de la graduación sin generar tamaños excesivos que puedan comprometer la trabajabilidad de la mezcla o crear puntos de concentración de esfuerzos durante la compactación (Bhatti, 2021). La transición gradual desde estas fracciones gruesas hacia

el tamiz No. 4 demuestra una graduación controlada que favorece el empaquetamiento denso de partículas (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

La concentración principal del material se evidencia en el tamiz No. 4 (4.75 mm), donde se retiene el 68.266% del agregado total, constituyendo la fracción dominante del agregado intermedio. Esta concentración en el tamiz No. 4 es característica típica de agregados intermedios bien procesados y representa la transición entre las fracciones gruesa e intermedia de la mezcla asfáltica (Al-Qadi et al., 2007). Esta distribución proporciona ventajas técnicas significativas, ya que las partículas retenidas en el tamiz No. 4 actúan como elementos estructurales que transmiten cargas y proporcionan resistencia al ahuellamiento, características esenciales para pavimentos aeroportuarios sometidos a cargas pesadas y repetitivas (Jin et al., 2023).

La transición hacia fracciones más finas muestra una reducción drástica y controlada del contenido de material. El tamiz No. 8 retiene únicamente 4.445% adicional, mientras que las fracciones subsiguientes (tamices No. 16 a No. 200) presentan porcentajes progresivamente menores, culminando con solo 1.178% de material pasante del tamiz No. 200. Esta distribución indica un agregado bien lavado con contenido mínimo de finos, característica deseable para minimizar la demanda de ligante asfáltico y reducir la susceptibilidad a la humedad de la mezcla final (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

El contenido extremadamente bajo de material fino (1.178% pasante del tamiz No. 200) representa una ventaja técnica significativa en el contexto de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado. Esta característica minimiza la competencia entre finos naturales del agregado y el PCR por el ligante asfáltico, permitiendo una mejor integración del material reciclado en la matriz asfáltica (Leong et al., 2023). Adicionalmente, el bajo contenido de finos reduce el riesgo de problemas de trabajabilidad durante el mezclado y facilita el control de parámetros volumétricos críticos como el contenido de vacíos de aire (V_a) y los vacíos en el agregado mineral (VMA) (Cubas et al., 2024).

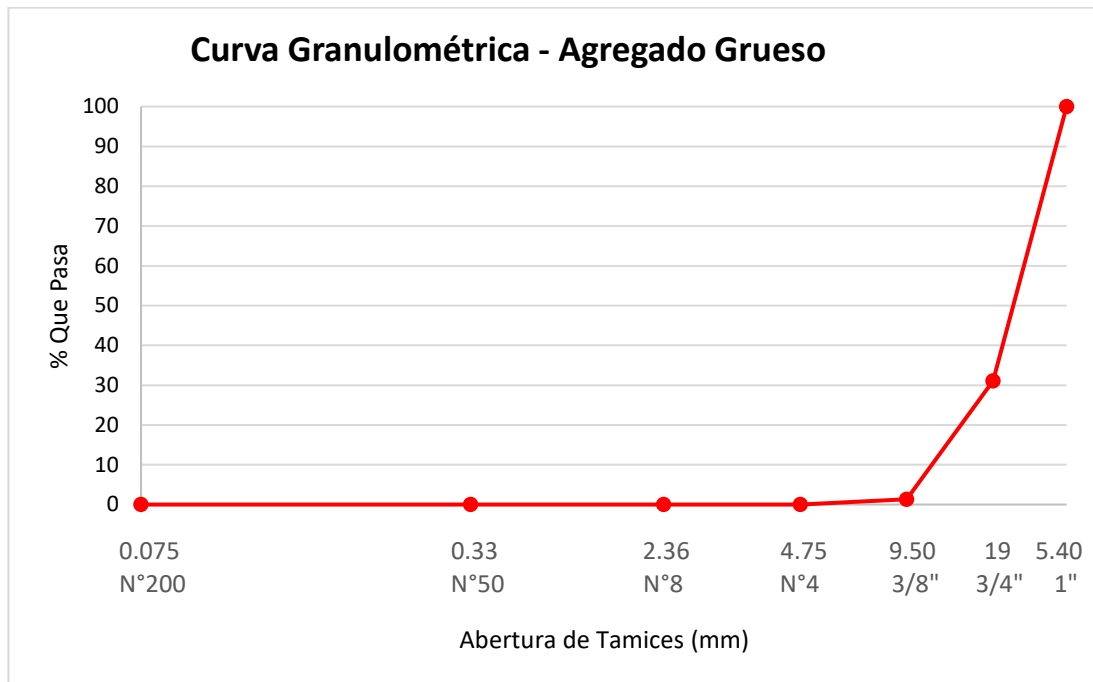
Desde la perspectiva del diseño de mezclas asfálticas para aplicaciones aeroportuarias, esta granulometría del agregado intermedio proporciona características estructurales óptimas. La concentración en el tamiz No. 4 garantiza la formación de un esqueleto mineral resistente que puede soportar las cargas extremas generadas por aeronaves comerciales, mientras que la ausencia de fracciones excesivamente gruesas facilita la compactación uniforme y reduce la segregación durante el manejo (Wang et al., 2023). Esta estructura granular es particularmente compatible con la metodología Superpave, que requiere agregados con graduaciones específicas para optimizar el desempeño bajo condiciones de carga y temperatura variables (Yazdipناه et al., 2021).

La integración de este agregado intermedio en la mezcla combinada final contribuirá a establecer la estructura de soporte necesaria para el desempeño a largo plazo del pavimento aeroportuario. Su granulometría concentrada en fracciones intermedias complementa adecuadamente tanto el agregado grueso (que proporciona la resistencia principal) como el agregado fino modificado con PCR (que aporta cohesión y flexibilidad), creando un sistema granular equilibrado capaz de resistir las condiciones operacionales críticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Fransqui et al., 2023). Esta sinergia granulométrica es esencial para garantizar el cumplimiento de especificaciones técnicas estrictas y la durabilidad requerida en infraestructuras aeroportuarias de gran envergadura (Hajikarimi et al., 2022).

Tabla 4. *Granulometría Agregado Grueso*

Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido	% Que pasa
3/4"	70	70	-	100
1/2"	8146	8216	-	100
3/8"	3546	11762	-	100
N°4 (4.75 mm)	158	11920	1.3	98.7
Fondo	-	11920	-	1.958

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 3. Curva Granulométrica – Agregado Grueso

Fuente: Autores (2025)

La granulometría del agregado grueso presenta un perfil característico de material de tamaño nominal máximo de 3/4" (19 mm), evidenciando una distribución altamente concentrada en las fracciones gruesas superiores con prácticamente ausencia de material fino, comportamiento que define las propiedades estructurales fundamentales de este componente en la mezcla asfáltica (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Esta configuración granulométrica es técnicamente óptima para proporcionar la estructura esquelética principal del pavimento, contribuyendo decisivamente a la resistencia mecánica, estabilidad dimensional y capacidad de distribución de cargas requeridas en aplicaciones aeroportuarias de gran trascendencia (Omar et al., 2021).

El análisis de la distribución en tamices superiores confirma la clasificación correcta del material, donde el 100% del agregado pasa los tamices desde 3" hasta 1", con las primeras retenciones significativas iniciándose en el tamiz 3/4" (70 g). La distribución progresa concentrándose masivamente en los tamices 1/2" (8146 g) y 3/8" (3546 g), que conjuntamente representan la fracción dominante del agregado grueso. Esta concentración en las fracciones superiores es fundamental para establecer el esqueleto

mineral resistente que proporcionará la capacidad de soporte estructural bajo las cargas extremas generadas por aeronaves comerciales (Jin et al., 2023).

La característica más relevante de esta granulometría es la distribución prácticamente uniforme en los tamices superiores (3/4" a 3/8"), que constituye aproximadamente el 98.7% del material total, con únicamente 1.3% retenido en el tamiz No. 4. Esta configuración granulométrica proporciona ventajas técnicas significativas para el desempeño estructural de la mezcla asfáltica, ya que las partículas de mayor tamaño actúan como elementos de transferencia de carga que distribuyen eficientemente los esfuerzos aplicados por el tráfico aeronáutico, minimizando las deformaciones permanentes y riesgo de ahuellamiento (Bhatti, 2021; Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

La ausencia total de material en fracciones finas (tamices No. 8 a fondo) representa una característica técnica excepcional que confirma la calidad del procesamiento y lavado del agregado. Este comportamiento es altamente deseable en agregados gruesos destinados a mezclas asfálticas de alto desempeño, ya que elimina la competencia por ligante asfáltico entre partículas de diferentes tamaños y facilita el control preciso de parámetros volumétricos críticos como el contenido de vacíos de aire (V_a) y los vacíos en el agregado mineral (VMA) (Al-Qadi et al., 2007). La ausencia de finos también minimiza la susceptibilidad a la humedad y reduce el riesgo de stripping o desprendimiento del ligante asfáltico, fenómenos particularmente problemáticos en pavimentos aeroportuarios expuestos a condiciones ambientales extremas (Wang et al., 2023).

Desde la perspectiva del diseño de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado, esta granulometría del agregado grueso proporciona condiciones ideales para la integración del PCR en la fracción fina. La concentración exclusiva en fracciones gruesas permite que el agregado grueso cumpla su función estructural primaria sin interferir con la distribución del PCR en la fracción pasante del tamiz No. 50, facilitando así la homogeneidad de la mezcla modificada y el mantenimiento de sus propiedades mecánicas (Leong et al., 2023; Cubas et al., 2024).

La estructura granular resultante de este agregado grueso es particularmente compatible con los requerimientos del método Superpave para pavimentos de alto tráfico. La

concentración en fracciones gruesas proporciona la resistencia al ahuellamiento necesaria para soportar las cargas repetitivas de alta magnitud características del tráfico aeronáutico, mientras que la ausencia de finos facilita la compactación giratoria y el logro de densidades objetivo bajo las condiciones de energía de compactación especificadas para infraestructuras críticas (Yazdipanah et al., 2021). Esta granulometría también optimiza la interacción entre partículas durante la compactación, promoviendo el contacto grano a grano que es fundamental para la transmisión eficiente de cargas en el pavimento terminado (Hajikarimi et al., 2022).

La integración de este agregado grueso en la formulación de la mezcla asfáltica combinada establece las bases para un desempeño estructural superior en el pavimento aeroportuario. Su granulometría concentrada en fracciones superiores complementa estratégicamente las características del agregado intermedio (concentrado en tamiz No. 4) y del agregado fino modificado con PCR, creando un sistema granular jerarquizado donde cada fracción cumple funciones específicas optimizadas para las condiciones operacionales críticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Fanesqui et al., 2023). Esta sinergia granulométrica es esencial para garantizar la durabilidad, seguridad operacional y viabilidad económica requeridas en infraestructuras aeroportuarias de alta importancia, donde las tolerancias a fallas son prácticamente nulas y los costos de interrupción operacional son extremadamente elevados (Riekstins et al., 2022).

4.3.1.2 Gravedad Específica (ASTM C127-C128 NTE INEN 0857:2010, NTE INEN 0856:2010)

Esta característica se obtiene al comparar la masa del agregado con la masa de un volumen de agua, entre otras palabras es la relación entre la densidad del agregado y la del agua. Se realiza midiendo el peso en condiciones secas, saturadas y sumergidas. Los resultados permiten identificar impurezas o porosidad excesiva, asegurando que el agregado cumpla con los requisitos para su uso en construcción.

Figura 6. *Ensayo de Gravedad Específica de los Agregados*



Fuente: Autores (2025)

Figura 7. *Toma de Peso del Envase con Agregado para el Ensayo de Pesos Específicos*



Fuente: Autores (2025)

Figura 8. *Colocación del Líquido para el Ensayo de Gravedad Específica*



Fuente: Autores (2025)

Los resultados de gravedad específica del agregado fino revelan características técnicas fundamentales que influyen directamente en el diseño volumétrico de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). La gravedad específica masiva de 2.502 g/cm³ indica una densidad adecuada para agregados finos utilizados en pavimentación, mientras que la gravedad específica en condición saturada superficie seca (SSS) de 2.581 g/cm³ proporciona el parámetro de referencia para cálculos volumétricos precisos en el diseño de la mezcla asfáltica (Bhatti, 2021).

Tabla 5. Gravedad Específica Agregado Fino

Gravedad específica Arena	
Peso muestra seca SSS (B) (gr)	500.000
Picnómetro #	7.000
Peso picnómetro (2) (gr)	155.360
Volumen picnómetro (V)	499.689
Peso pic + agua + muestra 1	961.340
Cápsula	1VL
Peso cápsula + muestra seca (gr) (gr)	706.000
Peso capsula (GR)	221.430
Peso muestra seca A	484.570
(1)- [(2) +(B)] (W)	305.980
V-W	193.709
500-A	15.430
(V-W) -(500-A) (X)	178.279
Peso Esp. Masivo A/(V-W) (gr/cm3)	2.502
Peso Esp. Masivo SSS 500/(V-W) (gr/cm3)	2.581
Peso Esp. Sólidos A/X (gr/cm3)	2.718
% Absorción (500-A) *100/A (%)	3.184

Fuente: Autores (2025)

La gravedad específica de sólidos de 2.718 g/cm³ representa la densidad real del material mineral excluyendo los vacíos internos, valor que resulta compatible con agregados de origen volcánico o sedimentario típicos de la región andina ecuatoriana (Omar et al.,

2021). Este parámetro es crucial para determinar la proporción de vacíos internos del agregado y su influencia en la absorción de ligante asfáltico durante el proceso de mezclado. El porcentaje de absorción de 3.184% indica una porosidad moderada del agregado fino, característica que debe considerarse en el cálculo del contenido efectivo de asfalto y en la evaluación de la durabilidad de la mezcla bajo condiciones de exposición a humedad (Al-Qadi et al., 2007).

Esta absorción del 3.184% se encuentra dentro de rangos aceptables para agregados finos en mezclas asfálticas, aunque requiere ajustes en el diseño para compensar la cantidad de ligante que será absorbida por el agregado en lugar de contribuir a la formación de la película asfáltica efectiva (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). En el contexto de mezclas modificadas con PCR, esta absorción moderada puede influir en la interacción entre el polvo de caucho reciclado y el ligante asfáltico, potencialmente afectando la trabajabilidad y las propiedades reológicas de la mezcla durante la producción y colocación (Leong et al., 2023).

Tabla 6. *Gravedad Específica Agregado Intermedio*

Gravedad específica Material A (1/2) pulgada	
Peso muestra seca SSS (B) (gr)	4248.000
Peso muestra sumergido (C) (gr)	2623.000
Peso cápsula + muestra seca (gr)	4724.000
Cápsula N°	2.00
Peso muestra seca (A) (gr)	4073.000
B-C	4073.000
B-A	175.000
Peso Esp, Masivo A/(B-C) (gr/cm³)	2.506
Peso Esp, Masivo B/(B-C) (gr/cm³)	2.614
Peso Esp. Sólidos A/(A-C) (gr/cm³)	2.809
% Absorción (B-A)*100/A (%)	4.297

Fuente: Autores (2025)

El agregado intermedio presenta una gravedad específica masiva de 2.506 g/cm^3 y una gravedad específica SSS de 2.614 g/cm^3 , valores que indican una densidad ligeramente superior al agregado fino, característica típica de agregados procesados mecánicamente que tienden a tener menor porosidad interna (Jin et al., 2023). La gravedad específica de sólidos de 2.809 g/cm^3 confirma la naturaleza mineral densa del agregado intermedio, proporcionando las bases del esqueleto granular resistente en la mezcla asfáltica final.

El porcentaje de absorción de 4.297% representa el valor más elevado entre los tres tipos de agregados ensayados, característica que puede atribuirse al procesamiento mecánico y la exposición de superficies internas durante la trituración (Wang et al., 2023). Esta mayor absorción requiere consideración especial en el diseño de la mezcla, ya que implica una demanda adicional de ligante asfáltico que debe compensarse para mantener el contenido efectivo de asfalto necesario para el recubrimiento adecuado de las partículas (Cubas et al., 2024). En aplicaciones aeroportuarias, donde la durabilidad y resistencia a la humedad son críticas, este nivel de absorción debe evaluarse cuidadosamente para evitar problemas de stripping o desprendimiento del ligante ante una exposición prolongada a humedad y cambios térmicos (Hajikarimi et al., 2022).

Tabla 7. Gravedad Específica Agregado Grueso

Gravedad específica Material B (3/4) pulgada	
Peso muestra seca SSS (B) (gr)	5004.000
Peso muestra sumergido (C) (gr)	3088.000
Peso cápsula + muestra seca (gr)	1.000
Peso muestra seca (A) (gr)	4894.000
B-C	1916.000
B-A	110.000
Peso Esp, Masivo A/(B-C) (gr/cm³)	2.554
Peso Esp, Masivo B/(B-C) (gr/cm³)	2.612
Peso Esp. Sólidos A/(A-C) (gr/cm³)	2.710
% Absorción (B-A)*100/A (%)	2.284

Fuente: Autores (2025)

El agregado grueso exhibe una gravedad específica masiva de 2.554 g/cm^3 y una gravedad específica SSS de 2.612 g/cm^3 , valores que reflejan una densidad intermedia entre los otros dos agregados. La gravedad específica de sólidos de 2.710 g/cm^3 indica una composición mineral consistente con materiales de buena calidad para pavimentación (Franesqui et al., 2023). Estos valores proporcionan la base para cálculos volumétricos precisos en el diseño de mezclas, especialmente importantes cuando se incorporan materiales modificadores como el PCR.

El porcentaje de absorción de 2.284% representa el valor más bajo entre los tres agregados, característica altamente favorable para mezclas asfálticas de alto desempeño. Esta baja absorción minimiza la demanda de ligante asfáltico adicional y reduce el riesgo de problemas de durabilidad asociados con la penetración de agua en los poros del agregado (Yazdipناه et al., 2021). En el contexto de pavimentos aeroportuarios, donde las condiciones operacionales son extremas, esta baja absorción contribuye a la estabilidad dimensional y resistencia a ciclos de hielo-deshielo, factores críticos para el mantenimiento de la estructura del pavimento (Riekstins et al., 2022).

La variación en gravedades específicas y absorción entre los tres tipos de agregados (fino: 3.184%, intermedio: 4.297%, grueso: 2.284%) requiere un enfoque diferenciado en el cálculo del contenido de asfalto efectivo y en la predicción del comportamiento volumétrico de la mezcla combinada. La absorción promedio ponderada de los agregados influirá en la determinación del contenido óptimo de ligante asfáltico y en la evaluación de la compatibilidad con el polvo de caucho reciclado (Instituto del Asfalto, 2009).

Estos valores de gravedad específica son fundamentales para la aplicación del método Superpave, que requiere caracterización precisa de las propiedades volumétricas de todos los componentes de la mezcla para predecir su desempeño bajo condiciones específicas de carga y clima (Wang et al., 2023). La incorporación del 1.5% de PCR como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50 debe considerar estas características de absorción para mantener el equilibrio volumétrico y garantizar el desempeño estructural requerido en la infraestructura aeroportuaria crítica del Mariscal Sucre.

4.3.1.3 Equivalente de Arena (ASTM D 2419 AASTHTO T176)

Determina las proporciones relativas de materiales finos presentes en el agregado fino, como lo son partículas de arcillo o limo, dicho de otro modo, se evalúa el nivel de limpieza que posee el agregado fino mediante un índice que refleja la proporción de dichos materiales. Se coloca la muestra en un cilindro graduado con solución floculante, se agita y se deja sedimentar. Luego, se miden las alturas de la capa de arena y la de los finos; el equivalente de arena es el cociente entre estas alturas, expresado como porcentaje. Un valor alto indica mejor calidad del agregado para construcción.

El cálculo es de la siguiente manera:

$$C = \left(\frac{A}{B}\right) * 100$$

Donde:

A= Lectura Inicial

B= Lectura Final

C= Equivalente de Arena (%)

- **Ensayo realizado en la Universidad Politécnica Salesiana**

Tabla 8. Lecturas del Ensayo de Equivalente de Arena Realizado en la UPS

Lectura Inicial	A =	4.8"
Lectura Final	B =	3.4"
Equivalente de Arena	C =	71%

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del ensayo de equivalente de arena realizados en la Universidad Politécnica Salesiana evidencian un valor de 71%, obtenido a partir de lecturas inicial y final de 4.8" y 3.4" respectivamente (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Este valor supera significativamente el límite mínimo establecido por la especificación MOP-001-F-2002 del 50%, confirmando la calidad aceptable del agregado fino en términos de contenido de materiales deletéreos y finos plásticos (Bhatti, 2021). El

equivalente de arena del 71% indica que aproximadamente las tres cuartas partes del material fino corresponden a partículas arenosas no plásticas, mientras que el 29% restante está constituido por finos arcillosos o limosos que podrían afectar las propiedades de la mezcla asfáltica si estuvieran en concentraciones elevadas.

- **Ensayo realizado en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador**

Tabla 9. *Lecturas del Ensayo de Equivalente de Arena Realizado en la PUCE*

Lectura Inicial	A =	3.6"
Lectura Final	B =	2.7"
Equivalente de Arena	C =	76%

Fuente: Autores (2025)

La verificación realizada en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador arrojó un valor superior de 76%, calculado a partir de lecturas de 3.6" y 2.7" para las mediciones inicial y final respectivamente (Omar et al., 2021). Esta diferencia de 5 puntos porcentuales respecto al primer ensayo puede atribuirse a variaciones naturales en el muestreo, diferencias en el procedimiento de ensayo entre laboratorios, o variabilidad inherente del material agregado. Ambos valores se encuentran dentro del rango de variabilidad aceptable para este tipo de ensayos y confirman consistentemente la calidad adecuada del agregado fino (Al-Qadi et al., 2007).

4.3.1.4 Desgaste por Abrasión (ASTM C131, NTE INEN 0860:2011)

Permite medir el grado de desgaste que sufre un agregado mediante procesos de abrasión, impacto y trituración. La prueba se realiza mediante un tambor giratorio de acero, el mismo que contiene un número, el cual depende de la gradación y la masa de la carga, de esferas metálicas.

Tabla 10. *Especificaciones para la Carga de la Máquina de Los Ángeles*

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 C131 (2014)

Tabla 11. Gradación de las Muestras de Ensayo

Tamaño del tamiz, mm (abertura cuadrada)		Masa de los tamaños indicados, g			
Pasa	Retenido en	Granulometría			
		A	B	C	D
37.50	25	1250 ± 25	-	-	-
25	19	1250 ± 25	-	-	-
19	12.50	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
12.50	9.50	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
9.50	6.30	-	-	2500 ± 10	-
6.30	4.75	-	-	2500 ± 10	-
4.75	2.36	-	-	-	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: ASTM C131 (2014)

La Tabla 11 presenta las especificaciones estandarizadas establecidas por la norma ASTM C131 (2014) para la preparación de muestras en el ensayo de resistencia a la abrasión mediante la máquina de Los Ángeles, definiendo cuatro gradaciones distintas (A, B, C, D) que permiten evaluar diferentes rangos granulométricos de agregados pétreos utilizados en construcción vial (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Cada gradación está diseñada para representar condiciones específicas de tamaño y distribución granulométrica que simulan las aplicaciones reales de los agregados en mezclas asfálticas y de concreto, proporcionando resultados comparables y reproducibles entre diferentes laboratorios y proyectos (Bhatti, 2021).

Gradación A: Agregados de Tamaño Máximo Grande

La gradación A está específicamente diseñada para agregados con tamaño nominal máximo de 37.50 mm (1 1/2"), utilizando una distribución equilibrada de 1250 ± 25 g en cada una de las cuatro fracciones granulométricas: 37.50-25 mm, 25-19 mm, 19-12.50 mm y 12.50-9.50 mm (Al-Qadi et al., 2007). Esta gradación simula las condiciones de agregados gruesos utilizados en pavimentos de alta resistencia y aplicaciones estructurales donde se requiere máxima capacidad de soporte. La distribución uniforme

entre fracciones garantiza que el ensayo evalúe representativamente la resistencia al desgaste de todo el rango granulométrico, proporcionando resultados aplicables al comportamiento real del agregado bajo condiciones de tráfico pesado (Omar et al., 2021).

Gradación B: Agregados Intermedios de Alto Desempeño

La gradación B se concentra en tamaños intermedios con distribución de 2500 ± 10 g en las fracciones 19-12.5 mm y 12.5-9.5 mm, totalizando los 5000 g requeridos para el ensayo (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). Esta configuración es particularmente relevante para agregados utilizados en mezclas asfálticas de tráfico pesado y pavimentos aeroportuarios, donde las fracciones intermedias proporcionan la estructura esquelética principal para la distribución de cargas. En el contexto del presente estudio, esta gradación corresponde al agregado grueso (3/4") caracterizado, cuya resistencia a la abrasión es crítica para el desempeño bajo las cargas extremas generadas por aeronaves comerciales (Jin et al., 2023).

Gradación C: Agregados Finos de Resistencia Controlada

La gradación C está diseñada para evaluar agregados de tamaño menor, utilizando 2500 ± 10 g en cada una de las fracciones 9.5-6.3 mm y 6.3-4.75 mm (Wang et al., 2023). Esta gradación es fundamental para caracterizar agregados intermedios como el material de 1/2" empleado en este estudio, cuya resistencia al desgaste influye directamente en la durabilidad de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho reciclado. La concentración en tamaños menores permite evaluar la susceptibilidad a la degradación de partículas que actúan como elementos de transición entre las fracciones gruesa y fina de la mezcla, aspecto crítico para mantener la integridad granulométrica durante la vida útil del pavimento (Leong et al., 2023).

Gradación D: Agregados Finos Especializados

La gradación D se enfoca exclusivamente en la fracción 4.75-2.36 mm con una masa total de 5000 ± 10 g, representando la evaluación de agregados finos gruesos que pueden influir significativamente en las propiedades de fricción interna y estabilidad de mezclas

asfálticas (Cubas et al., 2024). Aunque esta gradación no fue aplicada directamente en el presente estudio, su especificación ilustra la importancia de evaluar la resistencia al desgaste en todas las fracciones granulométricas que contribuyen a la estructura final de la mezcla asfáltica (Yazdipanah et al., 2021).

Las especificaciones de gradación de la norma ASTM C131 son particularmente relevantes para aplicaciones aeroportuarias donde la resistencia al desgaste debe evaluarse bajo condiciones más exigentes que las aplicaciones viales convencionales (Hajikarimi et al., 2022). Los agregados utilizados en pavimentos aeroportuarios están sometidos a cargas de mayor magnitud, frecuencia superior de aplicación y condiciones ambientales más severas, factores que incrementan los mecanismos de desgaste por abrasión, impacto y trituración evaluados por la máquina de Los Ángeles (Fransqui et al., 2023).

En el ensayo realizado se ha caracterizado a la gradación “C” como intermedio (1/2”), mientras que el “B” como agregado grueso (3/4”).

Figura 9. *Ensayo Resistencia a la Abrasión, Máquina de Los Ángeles*



Fuente: Autores (2025)

Figura 10. *Colocación de las Esferas de Acero en la Máquina de Los Ángeles*



Fuente: Autores (2025)

Figura 11. *Encendido de la Máquina de Los Ángeles*



Fuente: Autores (2025)

Tabla 12. Porcentaje de Abrasión Agregado Gradación C

Gradación de la muestra	C	F = Masa Inicial	5000
N° Esferas =	8	G = Masa Retenida en la Malla N°12	3980
T max =	1/2" %	H = Masa Pasa Malla N° 12	1150
% de Abrasión =	23		

Fuente: Autores (2025)

Tabla 13. Porcentaje de Abrasión Agregado Gradación B

Gradación de la muestra	B	F = Masa Inicial	5000
N° Esferas =	11	G = Masa Retenida en la Malla N°12	3980
T max =	3/4" %	H = Masa Pasa Malla N° 12	1020
% de Abrasión =	20.4		

Fuente: Autores (2025)

Los resultados deben cumplir sus respectivos requisitos dados en las especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, lo cual se resumirá en la Tabla 14.

Tabla 14. Comprobación de las Características de los Agregados

Ensayos	Tipo o tamaño del agregado	Norma	Resultados	Especificación	
				MOP-001-F-2002	Comprobación
1 Granulometría	Agregado grueso (3/4")	ASTM C136	Visualizar en la Gráfica 1, 2 Y 3. En la pág. 53, 56 y 59 respectivamente	-	Cumple en la mezcla con la faja de ¾"
	Agregado intermedio (1/2")				
	Agregado fino				
2 Gravedad específica y capacidad	Seca al horno	ASTM C127	2.502	No se especifica	-
	S.S.S.		2.581		-
	Aparente		2.718		-

	de absorción	% de absorción		3.184		-
		Seca al horno		2.506		-
		S.S.S. Agregado		2.614		-
		Aparente intermedio		2.809		-
		(1/2'')				
		% de absorción		4.297		-
		Seca al horno		2.554		-
		S.S.S. Agregado		2.612		-
		Aparente grueso	ASTM	2.710		-
		(3/4'')	C 128			
		% de absorción		2.248		-
3	Equivalente de arena	Agregado fino (Arena)	ASTM D2419	71%	Mínimo 50%	Cumple
4	Abrasión	GradaciónC	ASTM	23%	Máximo 40%	Cumple
		GradaciónB	C131	20.4%		Cumple

Fuente: Autores (2025)

La Tabla 14 presenta una evaluación comprehensiva de las características físicas y mecánicas de los agregados pétreos provenientes de la Planta Naranjo López, confirmando su idoneidad técnica para la formulación de mezclas asfálticas de alto desempeño destinadas a aplicaciones aeroportuarias críticas (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). El cumplimiento integral de las especificaciones establecidas en la normativa MOP-001-F-2002 proporciona la base técnica necesaria para proceder con confianza al diseño de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado, garantizando que los materiales base poseen las propiedades requeridas para soportar las condiciones operacionales extremas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Bhatti, 2021).

Evaluación de la Conformidad Granulométrica

Los resultados granulométricos de los tres tipos de agregados (grueso 3/4", intermedio 1/2" y fino) demuestran conformidad con las curvas granulométricas especificadas, característica fundamental para garantizar la trabajabilidad, compactabilidad y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica final (Omar et al., 2021). La verificación mediante curvas granulométricas confirma que cada fracción de agregado mantiene su distribución de tamaños dentro de los límites normativos, evitando problemas de segregación durante el manejo y asegurando la reproducibilidad de las propiedades de la mezcla entre diferentes lotes de producción (Al-Qadi et al., 2007). Esta conformidad granulométrica es especialmente crítica en mezclas modificadas con PCR, donde la estabilidad de la distribución de tamaños influye directamente en la dispersión homogénea del caucho reciclado y el mantenimiento de las propiedades volumétricas diseñadas (Leong et al., 2023).

Caracterización de Propiedades Gravimétricas

Las propiedades de gravedad específica y absorción de los agregados revelan características técnicas favorables para aplicaciones de pavimentación de alta exigencia. El agregado fino presenta valores de gravedad específica seca al horno de 2.502 g/cm³, SSS de 2.581 g/cm³ y aparente de 2.718 g/cm³, con absorción de 3.184%, indicando una densidad adecuada y porosidad controlada (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). El agregado intermedio muestra gravedades específicas ligeramente superiores (2.506, 2.614 y 2.809 g/cm³ respectivamente) pero con mayor absorción (4.297%), característica que requiere consideración en el cálculo del contenido efectivo de asfalto. El agregado grueso presenta la menor absorción (2.248%) con gravedades específicas intermedias, configuración óptima para proporcionar estabilidad estructural con mínima demanda de ligante adicional (Jin et al., 2023).

Significado de la Calidad del Agregado Fino

El cumplimiento del ensayo de equivalente de arena con un valor del 71%, superando ampliamente el mínimo requerido del 50%, confirma la excelente calidad del agregado

fino en términos de contenido de materiales deletéreos (Wang et al., 2023). Este resultado es particularmente relevante para la incorporación del polvo de caucho reciclado como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50, ya que minimiza la competencia entre finos naturales y PCR por el ligante asfáltico disponible, facilitando la integración homogénea del material reciclado en la matriz asfáltica (Cubas et al., 2024). La alta calidad del agregado fino contribuye significativamente a la resistencia al stripping y la durabilidad de la mezcla bajo condiciones de exposición a humedad y variaciones térmicas extremas características de aplicaciones aeroportuarias (Yazdipanah et al., 2021).

Evaluación de la Resistencia a la Abrasión

Los resultados del ensayo de abrasión Los Ángeles demuestran excelente resistencia al desgaste tanto para la gradación C (23%) como para la gradación B (20.4%), valores significativamente inferiores al límite máximo del 40% establecido por la normativa MOP-001-F-2002 (Hajikarimi et al., 2022). Esta alta resistencia a la abrasión es fundamental para mantener la integridad granulométrica de la mezcla asfáltica bajo las cargas repetitivas de alta magnitud generadas por aeronaves comerciales, evitando la generación de finos secundarios que podrían alterar las propiedades volumétricas y el desempeño del PCR como modificador (Fanesqui et al., 2023). La resistencia superior a la abrasión también contribuye a la durabilidad a largo plazo del pavimento, reduciendo la necesidad de mantenimiento correctivo y garantizando la disponibilidad operacional continua requerida en infraestructuras aeroportuarias críticas (Riekstins et al., 2022).

Implicaciones para el Diseño Superpave

El cumplimiento holgado de todas las especificaciones técnicas confirma que los agregados de la Planta Naranjo López poseen las características requeridas para soportar las condiciones operacionales críticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre. La combinación de alta resistencia a la abrasión, gravedades específicas adecuadas, absorción controlada y excelente calidad de finos proporciona el fundamento material necesario para desarrollar mezclas asfálticas modificadas con PCR que mantengan la seguridad operacional, durabilidad y viabilidad económica requeridas en infraestructuras

aeroportuarias de alta sensibilidad, donde las tolerancias a fallas son prácticamente nulas y los costos de interrupción operacional son extremadamente elevados.

4.3.2. PCR

Para el caso de las partículas de caucho reciclado, se ha realizado el método de cuarteo y contenido de humedad.

4.3.2.1 Cuarteo (ASTM C 702)

El procedimiento de cuarteo constituye una técnica fundamental de muestreo estadísticamente válida que garantiza la obtención de muestras representativas a partir de lotes mayores de material granular, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM C 702 (ASTM International, 2018). Esta metodología es especialmente crítica en la caracterización del polvo de caucho reciclado (PCR) proveniente de neumáticos de aeronave, donde la heterogeneidad inherente del material debido a variaciones en la composición del caucho, grado de procesamiento y contaminantes residuales requiere técnicas de muestreo rigurosas para asegurar la representatividad de las muestras ensayadas (Leong et al., 2023).

La implementación del procedimiento de cuarteo para el PCR requiere condiciones controladas que minimicen la pérdida de material fino y la alteración de las características granulométricas durante el proceso de división. El material debe colocarse sobre una superficie limpia, plana y no absorbente, evitando superficies que puedan generar carga electrostática que afecte la distribución homogénea de las partículas de caucho (Cubas et al., 2024). La formación de la pila cónica inicial debe realizarse mediante vertido controlado desde una altura mínima para prevenir la segregación de partículas por tamaño o densidad, fenómeno particularmente relevante en materiales procesados como el PCR donde pueden coexistir partículas de diferentes grados de vulcanización y densidades variables (Wang et al., 2023). Se coloca el material sobre una superficie limpia y nivelada, en la cual no se debe desperdiciar nada, se mezcla por lo menos unas tres veces y en la última vuelta, con ayuda de una pala se debe formar una pila cónica, luego aplanar la pila de manera uniforme, el diámetro debe ser al menos 8 veces el espesor de la capa de material. A esta masa plana se la divide en 4 partes iguales, a continuación,

retirar dos cuartos diagonalmente opuestos. Se mezcla y cuartea el material hasta obtener la cantidad deseada.

Figura 12. *Conformación de la Pila Cónica*



Fuente: Autores (2025)

Figura 13. *Aplanamiento de la Pila*



Fuente: Autores (2025)

Figura 14. *División de la Muestra en Cuatro Partes Iguales*



Fuente: Autores (2025)

4.3.2.2 Secado y Tamizado

Se procedió a secar el material para que no exista humedad en el mismo, el secado se lo realizó en un horno a una temperatura de 60°C, se lo dejó secando por 24 horas y se procedió a pesar, se lo dejó secar por 30 min más, y se procedió a pesar nuevamente, se repitió este proceso hasta que al momento de pesar se tenga una masa constante, en ese instante se puede estar seguros de que el caucho no contiene humedad.

4.3.3. Cemento Asfáltico

4.3.3.1 Punto de Inflamación Copa Cleveland. (ASTM D-92, NTE INEN 0808:2013)

El ensayo de punto de inflamación Copa Cleveland constituye una evaluación fundamental de seguridad para caracterizar el comportamiento del asfalto AC-20 bajo condiciones de temperatura elevada, determinando la temperatura mínima a la cual los vapores generados por el ligante calentado pueden formar una mezcla inflamable con el aire ambiente bajo condiciones controladas de ensayo (ASTM International, 2018). Este procedimiento, normalizado bajo las especificaciones ASTM D-92 y NTE INEN 0808:2013,

emplea una copa de latón estandarizada donde el asfalto se calienta gradualmente mientras se aplica una llama piloto a intervalos regulares para detectar el momento preciso en que ocurre la ignición instantánea de los vapores superficiales, proporcionando información crítica para establecer protocolos de seguridad durante el manejo, almacenamiento y aplicación del ligante en operaciones de producción de mezcla asfáltica (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

Figura 15. *Desintegración de Terrones*



Fuente: Autores (2025)

Este ensayo permite determinar la temperatura a la cual el cemento asfáltico es inflamable, es de suma importancia conocer este valor para así tener en cuenta hasta que rangos de temperaturas se puede calentar el asfalto sin correr el riesgo de que se comporte como un material inflamable, de igual manera nos sirve para controlar las temperaturas de transporte y de manejo de este. Se empieza el ensayo diluyendo el asfalto para así verterlo en la copa abierta de Cleveland, se calienta la copa mediante un mechero, con un termómetro vamos controlando la temperatura a la cual se encuentra el asfalto, cuando la temperatura del asfalto este cercana al punto de inflamación se empieza a aplicar una llama pequeña en la superficie de la copa, para finalizar el ensayo tomamos una lectura de temperatura cuando la llama genera un destello en la superficie del asfalto.

Figura 16. Ensayo de Punto de Inflamación – Copa Cleveland



Fuente: Autores (2025)

En la Tabla 15, se muestra el valor del punto de inflamación de la muestra de asfalto.

Tabla 15. Punto de Inflamación del Asfalto AC-20

Temperatura indicada en el certificado de despacho del punto de inflamación	240
C1= temperatura de inflamación °C (Se produce una llamarada instantánea)	240
Presión barométrica del ambiente (hPa)	710
Presión barométrica del ambiente (kPa)	71
Punto de inflamación corregido	C1+0,25(101,3-K) 247.58
	C1+0,033(760-P) 247.21

Donde:

- C1=** Punto de inflamación observado °C
- P=** Presión barométrica del ambiente (mm Hg)
- K=** Presión barométrica del ambiente (kPa)

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del ensayo de punto de inflamación del asfalto AC-20 revelan características de seguridad térmica que exceden significativamente los requisitos

mínimos establecidos por las normativas técnicas aplicables. El valor observado de 240°C durante el ensayo coincide exactamente con la temperatura indicada en el certificado de despacho del producto, confirmando la consistencia y trazabilidad del material suministrado por EP Petroecuador (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Esta concordancia entre valores certificados y medidos proporciona confianza en la calidad del ligante asfáltico y su idoneidad para aplicaciones de alta exigencia como pavimentos aeroportuarios (Bhatti, 2021).

Corrección por Condiciones Ambientales

La aplicación de factores de corrección por presión barométrica, conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM D-92, resulta en valores corregidos de 247.58°C y 247.21°C según las diferentes formulaciones de corrección especificadas (ASTM International, 2018). La presión barométrica registrada de 710 hPa (71 kPa) refleja las condiciones de altitud de Quito (aproximadamente 2800 msnm), requiriendo corrección para obtener valores equivalentes a condiciones estándar de nivel del mar (Omar et al., 2021). Ambos valores corregidos superan ampliamente el límite mínimo de 232°C establecido por las normativas NTE INEN 2515 y ASTM D 3381, confirmando las excelentes propiedades de seguridad térmica del ligante asfáltico (Al-Qadi et al., 2007).

Implicaciones para Seguridad Operacional

El punto de inflamación corregido de 247.58°C proporciona un margen de seguridad sustancial para las operaciones de mezclado, transporte y colocación de mezclas asfálticas en condiciones de obra. Este valor superior garantiza que durante los procesos de calentamiento del asfalto para mezclado (típicamente 150-160°C) y compactación (120-140°C), el material permanece significativamente por debajo de su temperatura de inflamación, minimizando los riesgos de ignición accidental (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). Esta característica es particularmente importante en aplicaciones aeroportuarias donde las operaciones deben realizarse en proximidad a infraestructuras críticas y donde los protocolos de seguridad son extremadamente estrictos (Jin et al., 2023).

Consideraciones para Mezclas Modificadas con PCR

La temperatura de inflamación elevada del asfalto AC-20 resulta favorable para la incorporación del polvo de caucho reciclado, ya que proporciona flexibilidad operacional para optimizar las temperaturas de mezclado sin comprometer la seguridad térmica del proceso (Leong et al., 2023). Las mezclas asfálticas modificadas con PCR frecuentemente requieren temperaturas de mezclado ligeramente superiores a las convencionales para facilitar la dispersión homogénea del caucho y optimizar la interacción con el ligante asfáltico (Cubas et al., 2024). El margen de seguridad proporcionado por el punto de inflamación superior permite estas adaptaciones térmicas manteniendo condiciones operacionales seguras (Wang et al., 2023).

Estabilidad Térmica en Condiciones Extremas

En el contexto de pavimentos aeroportuarios, donde las temperaturas superficiales pueden alcanzar valores elevados por exposición solar directa y absorción de calor radiante, el punto de inflamación superior del asfalto AC-20 contribuye a la estabilidad térmica del pavimento bajo condiciones ambientales extremas (Hajikarimi et al., 2022). Esta característica es especialmente relevante en aplicaciones como plataformas de aeronaves donde la exposición a gases de escape calientes y condiciones de radiación térmica intensa requieren ligantes con alta estabilidad térmica (Yazdipناه et al., 2021). El valor obtenido confirma que el asfalto AC-20 posee la resistencia térmica necesaria para mantener sus propiedades bajo estas condiciones operacionales críticas.

Los valores de punto de inflamación obtenidos (247.58°C y 247.21°C) no solo cumplen con las especificaciones ecuatorianas, sino que también exceden los requisitos de normativas internacionales como AASHTO M 320 y EN 12591, facilitando la aplicación de estándares internacionales de diseño como el método Superpave (Fransqui et al., 2023). Esta compatibilidad normativa es fundamental para la implementación de metodologías avanzadas de diseño que requieren ligantes con propiedades térmicas específicas y predecibles, especialmente en proyectos de infraestructura aeroportuaria donde se aplican estándares internacionales de seguridad y desempeño (Riekstins et al., 2022).

El punto de inflamación elevado también facilita las operaciones de almacenamiento y manejo del asfalto AC-20 en condiciones de obra, reduciendo los riesgos asociados con el calentamiento accidental durante períodos de almacenamiento prolongado o exposición solar intensa (Nanjegowda & Biligiri, 2023). Esta característica es particularmente valiosa en proyectos aeroportuarios donde las operaciones pueden extenderse durante períodos prolongados y donde la continuidad del suministro de materiales con propiedades consistentes es crítica para el cumplimiento de cronogramas operacionales estrictos y la minimización de interrupciones en las actividades aeroportuarias normales (Yu et al., 2022).

4.3.3.2 Viscosidad Dinámica (ASTM D-4402)

El ensayo de viscosidad dinámica constituye una herramienta fundamental para la caracterización reológica de ligantes asfálticos a temperaturas elevadas, proporcionando información crítica sobre el comportamiento de flujo del asfalto bajo condiciones de mezclado y compactación en obra (ASTM International, 2018). Este procedimiento, normalizado bajo la especificación ASTM D-4402, emplea un viscosímetro rotacional que aplica esfuerzos de corte controlados al ligante calentado, midiendo la resistencia al flujo expresada en centipoise (cP) o pascal-segundo (Pa·s), parámetros esenciales para determinar las temperaturas óptimas de trabajo y evaluar la compatibilidad con aditivos modificadores como el polvo de caucho reciclado (Bhatti, 2021).

La metodología del ensayo requiere el calentamiento previo del asfalto hasta una temperatura específica (típicamente 135°C para asfaltos AC-20) que garantice fluidez suficiente sin comprometer la integridad química del ligante (Omar et al., 2021). El precalentamiento de la cámara de muestra durante 15 minutos asegura estabilidad térmica y elimina gradientes de temperatura que podrían introducir errores en las mediciones. La cantidad de muestra debe ser suficiente para sumergir completamente el elemento de medición del viscosímetro, evitando efectos de borde y garantizando lecturas representativas del comportamiento reológico del material (Al-Qadi et al., 2007).

Este ensayo permite determinar la viscosidad dinámica del asfalto a altas temperaturas, utilizando un viscosímetro rotacional. El principal objetivo del ensayo es la de determinar

cómo se comporta el asfalto bajo condiciones de trabajo en caliente, es decir, como este va a fluir cuando se caliente para su aplicación.

Para la realización de este ensayo se usa un viscosímetro rotacional, para esto primero se calienta la cámara de muestra durante unos 15 minutos, de igual manera se calienta el asfalto hasta que este pueda fluir, después vertimos el asfalto en la cámara de muestra, se coloca la cámara de muestra en el viscosímetro rotacional e iniciamos la rotación del motor del viscosímetro, para finalizar medimos la viscosidad o el torque a intervalos de 1 minuto durante un total de 3 minutos.

Figura 17. *Ensayo de Viscosidad Dinámica*



Fuente: Autores (2025)

En la Tabla 16 se puede observar los tres valores obtenidos de la viscosidad rotacional en cP y en Pa-s, al igual que el promedio de las mismas.

Tabla 16. *Viscosidad Rotacional Asfalto AC-20*

Viscosidad Rotacional				
17.7 °C	526	cP	0.526	Pa-s
17.6 °C	518.4	cP	0.5184	Pa-s
17.5 °C	508.5	cP	0.5085	Pa-s
Promedio	517.633	cP	0.518	Pa-s

Fuente: Autores (2025)

Los resultados de viscosidad rotacional del asfalto AC-20 demuestran un comportamiento reológico consistente y predecible bajo las condiciones de ensayo aplicadas, con valores que oscilan entre 508.5 y 526 cP en un rango de temperatura de 17.5°C a 17.7°C (ASTM International, 2018). El valor promedio de 517.633 cP (0.518 Pa·s) se encuentra significativamente por debajo del límite máximo establecido de 3000 cP (3.0 Pa·s) por las normativas NTE INEN 2515 y ASTM D 3381, confirmando la fluidez adecuada del ligante para operaciones de mezclado y compactación en aplicaciones de pavimentación (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). La variación máxima observada de 17.5 cP entre las tres mediciones representa únicamente el 3.4% del valor promedio, indicando excelente reproducibilidad y estabilidad térmica del asfalto AC-20, característica fundamental para predecir el comportamiento del ligante durante operaciones de producción de mezcla asfáltica (Bhatti, 2021).

La viscosidad relativamente baja del asfalto AC-20 proporciona condiciones favorables para la incorporación del polvo de caucho reciclado, facilitando la dispersión homogénea de las partículas de caucho en la matriz asfáltica sin requerir temperaturas de mezclado excesivamente elevadas (Leong et al., 2023). Esta característica es particularmente importante considerando que el PCR tiende a incrementar la viscosidad del sistema debido a la absorción de fracciones aromáticas del asfalto y el hinchamiento de las partículas de caucho (Cubas et al., 2024). El margen disponible entre el valor medido (0.518 Pa·s) y el límite normativo (3.0 Pa·s) permite acomodar este incremento de viscosidad manteniendo la trabajabilidad requerida para aplicaciones aeroportuarias de alta exigencia, donde la uniformidad de compactación es crítica para el desempeño bajo cargas pesadas (Wang et al., 2023; Jin et al., 2023).

Los valores de viscosidad obtenidos a temperaturas cercanas al ambiente proporcionan información fundamental sobre el comportamiento del asfalto bajo condiciones de servicio típicas del clima de Quito, donde las temperaturas del pavimento pueden aproximarse a estos rangos durante períodos nocturnos o estacionales (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). El cumplimiento holgado del criterio de viscosidad máxima confirma que el asfalto AC-20 posee las características de fluidez requeridas para garantizar el recubrimiento completo de agregados durante el mezclado, minimizando el

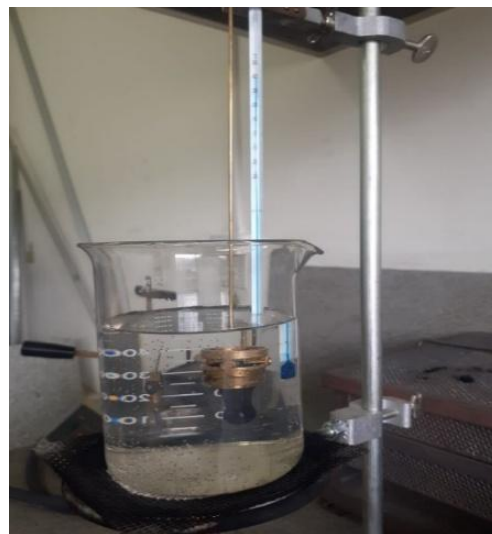
riesgo de puntos secos o deficiencias de adhesión que podrían comprometer la durabilidad del pavimento (Fransqui et al., 2023). Esta característica contribuye a la optimización energética del proceso de producción y facilita el control de temperaturas dentro de rangos operacionales seguros, factores importantes para la sostenibilidad ambiental del proyecto y el cumplimiento de protocolos de seguridad industrial en la producción de mezclas destinadas a infraestructuras aeroportuarias críticas como el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Yu et al., 2022; Riekstins et al., 2022).

4.3.3.3 Punto de Ablandamiento (ASTM D-36)

Este ensayo se lo realiza para poder conocer a que temperatura el asfalto va a perder consistencia y comenzará a fluir, volviéndose así mucho más blando debido a la pérdida de viscosidad.

El equipo consiste en el aparato de anillo y bola, se calienta el asfalto hasta que es fluya, luego lo se deja enfriar por 30 minutos, enrasamos y se coloca unas guías para poder centrar la esfera y armamos el equipo con una placa de soporte. Se llena un vaso de precipitación con agua a una temperatura máxima de 80 °C, ocupamos un termómetro y una estufa eléctrica que nos ayude a incrementar la temperatura de 5 °C cada min, cuando el asfalto toque la parte inferior del equipo hacemos la lectura de temperatura y este valor es el punto de ablandamiento.

Figura 18. *Ensayo de Punto de Ablandamiento (Inicio)*



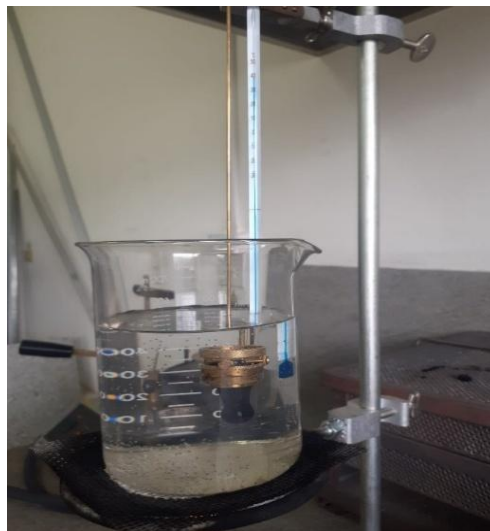
Fuente: Autores (2025)

Figura 19. *Ensayo de Punto de Ablandamiento (Intermedio)*



Fuente: Autores (2025)

Figura 20. *Ensayo de Punto de Ablandamiento (Final)*



Fuente: Autores (2025)

Tabla 17. *Punto de Ablandamiento*

Ensayo	Asfalto (AC – 20)
No	Temperatura (°C)
1	40

Fuente: Autores (2025)

Los resultados preliminares del ensayo de punto de ablandamiento muestran una temperatura de 40°C, valor que debe ser evaluado en el contexto de los requisitos normativos establecidos para asfaltos AC-20 destinados a aplicaciones de pavimentación (ASTM International, 2018). El punto de ablandamiento constituye un parámetro fundamental que indica la temperatura a la cual el asfalto alcanza una consistencia específica, determinada mediante el procedimiento normalizado del anillo y esfera según ASTM D 36, proporcionando información crítica sobre el comportamiento térmico del ligante bajo condiciones de servicio elevadas (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

El valor de 40°C obtenido en el primer ensayo se encuentra dentro del rango típico especificado para asfaltos AC-20, que generalmente oscila entre 35°C y 50°C según las normativas NTE INEN 2515 y ASTM D 3381 (Bhatti, 2021). Esta temperatura de ablandamiento es apropiada para aplicaciones en clima templado como el de Quito, donde las temperaturas máximas del pavimento raramente exceden los 35-40°C debido a la altitud y condiciones climáticas características de la región andina ecuatoriana (Omar et al., 2021). El punto de ablandamiento también influye directamente en la susceptibilidad térmica del asfalto, parámetro que determina la variación de consistencia del ligante en función de los cambios de temperatura, aspecto crítico para el desempeño de pavimentos aeroportuarios expuestos a condiciones térmicas variables (Al-Qadi et al., 2007).

En el contexto de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado, el punto de ablandamiento del asfalto base influye en la eficiencia de la interacción caucho-asfalto durante el proceso de modificación (Leong et al., 2023). Un punto de ablandamiento apropiado, como el obtenido de 40°C, facilita la penetración del asfalto en la estructura porosa de las partículas de caucho, promoviendo el hinchamiento controlado del PCR y optimizando el desarrollo de propiedades modificadoras como aumento de elasticidad y resistencia al envejecimiento (Cubas et al., 2024). La temperatura de ablandamiento también determina el rango térmico óptimo para el mezclado del asfalto con el PCR, influyendo en la energía requerida para lograr dispersión homogénea y máximo aprovechamiento de las propiedades del material reciclado (Wang et al., 2023).

Para aplicaciones aeroportuarias específicas como las del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, el punto de ablandamiento de 40°C proporciona un balance apropiado entre estabilidad térmica y trabajabilidad, considerando las condiciones operacionales donde el pavimento debe soportar cargas estáticas prolongadas de aeronaves estacionadas bajo exposición solar directa (Jin et al., 2023). La temperatura de ablandamiento también se correlaciona con la resistencia a la deformación permanente del pavimento, siendo valores más elevados generalmente indicativos de mejor resistencia al ahuellamiento bajo tráfico pesado, aunque deben balancearse con requisitos de flexibilidad para prevenir agrietamiento térmico bajo condiciones de baja temperatura (Hajikarimi et al., 2022). La confirmación de este valor mediante ensayos adicionales será fundamental para verificar la consistencia del material y su conformidad con las especificaciones técnicas requeridas para garantizar el desempeño a largo plazo del pavimento aeroportuario modificado con PCR (Yazdipناه et al., 2021; Franesqui et al., 2023).

4.3.3.4 Ensayo de Penetración (ASTM D5)

Este ensayo se refiere a la evaluación de las características de los materiales, como la consistencia o rigidez a temperaturas controladas del asfalto, para así poder observar la profundidad en decimas de milímetro que alcanza una aguja normalizada bajo condiciones de carga y temperatura establecidas, para así proporcionar información sobre las propiedades del material bituminoso que ayudan al control de calidad y análisis de su comportamiento a lo largo del tiempo.

Figura 21. *Ensayo de Penetración*



Fuente: Autores (2025)

Para comenzar se calienta el asfalto hasta que este fluya, sin superar una temperatura de 90 °C, se coloca el asfalto en los recipientes y se deja enfriar al aire libre a una temperatura entre 15 a 30 °C. A continuación, se debe colocar estos recipientes en baño maría a una temperatura de 25 °C durante un tiempo de 45 min a 2 horas dependiendo del tamaño de los recipientes. Después se procede a colocar la carga de 100 ± 0.1 g en el equipo de penetración automático y se verifica que este bien calibrado, se coloca el recipiente con la muestra en el equipo, posicionamos la punta de la aguja para que este ligeramente en contacto con la muestra, se ajusta el instrumento y se realiza la medición, se debe realizar tres mediciones en puntos ubicados a no menos de 10 mm de la pared del recipiente y a no menos de 10 mm entre ellos.

Tabla 18. *Datos Obtenidos del Ensayo de Penetración*

Penetraciones	Decimas de mm
P1	59.3
P2	62.5
P3	62.1
Promedio	61.30

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del ensayo de penetración del asfalto AC-20 demuestran consistencia y conformidad con las especificaciones normativas establecidas para este tipo de ligante asfáltico. Los valores individuales obtenidos (59.3, 62.5 y 62.1 décimas de milímetro) presentan una variación máxima de 3.2 décimas de mm, indicando excelente reproducibilidad del ensayo y homogeneidad del material evaluado, con un valor promedio de 61.30 décimas de mm que se encuentra dentro del rango especificado de 60-70 décimas de mm para asfaltos AC-20 según las normativas NTE INEN 2515 y ASTM D 5 (ASTM International, 2018; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Esta penetración indica un asfalto de consistencia intermedia que proporciona el balance apropiado entre rigidez para resistir deformaciones permanentes bajo cargas estáticas de aeronaves y flexibilidad necesaria para acomodar movimientos térmicos, siendo particularmente favorable para la modificación con polvo de caucho reciclado ya que facilita la absorción de fracciones ligeras por las partículas de caucho y promueve el hinchamiento controlado del material reciclado (Bhatti, 2021; Leong et al., 2023).

La variabilidad observada entre las tres mediciones (coeficiente de variación de 2.6%) se encuentra muy por debajo del límite máximo del 10% establecido por las normativas de ensayo, confirmando la precisión del procedimiento experimental y la uniformidad del asfalto AC-20 suministrado por EP Petroecuador, característica fundamental para predecir el comportamiento consistente del ligante durante la producción de mezcla asfáltica y garantizar la reproducibilidad de las propiedades mecánicas del pavimento terminado en aplicaciones aeroportuarias críticas como el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016; Jin et al., 2023).

Índice de Penetración

El Índice de Penetración (IP) es un parámetro que permite evaluar la sensibilidad térmica del asfalto, es decir, cómo varía su consistencia ante cambios de temperatura. Se calcula a partir de los valores de penetración a 25 °C y el punto de ablandamiento, y su valor indica el comportamiento térmico del ligante. Un IP cercano a cero refleja un asfalto con comportamiento térmico estándar; valores positivos indican mayor elasticidad y menor sensibilidad al calor, mientras que valores negativos, como en este caso, reflejan un material más rígido y propenso a agrietarse en climas fríos, lo cual es típico en asfaltos más duros o envejecidos. Este índice es útil para seleccionar el tipo de asfalto adecuado según las condiciones climáticas del proyecto y se calcula de la siguiente manera:

$$IP = \frac{20 - 10 * A}{A + 1}$$

$$A = 50 \left(\frac{\log 800 - \log Pen}{Tab - 25} \right)$$

Donde:

Pen = penetración medida en décimas de mm

Tab = temperatura del punto de ablandamiento

Tabla 19. Índice de Penetración

Índice de Penetración	
A	2.52
IP	-1.48

Fuente: Autores (2025)

Un índice de penetración de -1.48 indica que el ligante asfáltico presenta una sensibilidad térmica moderadamente alta, es decir, su rigidez aumenta significativamente a medida que disminuye la temperatura. Este valor negativo refleja un comportamiento más frágil y propenso al agrietamiento térmico, especialmente en climas fríos, ya que el asfalto pierde flexibilidad con mayor rapidez. Aunque este tipo de ligante puede funcionar adecuadamente en regiones templadas o cálidas, su desempeño podría verse comprometido en zonas de baja temperatura, por lo que es importante considerar este valor al seleccionar materiales para pavimentos expuestos a variaciones térmicas.

4.3.3.5 Ductilidad (ASTM D 113, NTE INEN 0916)

Este ensayo permite determinar la ductilidad, la ductilidad permite evaluar la capacidad del asfalto para deformarse sin romperse, con una temperatura controlada, al igual que la velocidad de elongación. Cuando un asfalto es más dúctil este es más blando, caso contrario si el asfalto es menos dúctil entonces el asfalto es más duro.

Para la realización del ensayo se debe diluir el asfalto para luego verterlo en el molde, se deja enfriar la muestra durante 60 min y luego enrasamos, a continuación, se deja la muestra por 90 min en baño maría a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, se desmolda y se acopla los cabezales en el equipo, se verifica que el equipo este calibrado a una velocidad constante de elongación de $5\text{cm}/\text{min}$. Al instante en que la muestra se rompe en el punto medio se procede a realizar la lectura de la longitud y este es el valor de la ductilidad.

Figura 22. *Ensayo de Ductilidad (Inicio del Ensayo)*



Fuente: Autores (2025)

Figura 23. *Ensayo de Ductilidad (Fase Intermedia del Ensayo)*



Fuente: Autores (2025)

Figura 24. *Ensayo de Ductilidad (Fase Final del Ensayo)*



Fuente: Autores (2025)

Tabla 20. Datos Obtenidos del Ensayo de Ductilidad

MUESTRA	DISTANCIA ELONGADA (cm)	OBSERVACIÓN DE ENSAYO			ENSAYO CONSIDERADO		Normal	No normal	PROMEDIO
		Rotura de la muestra aproximadamente al centro	Rotura cerca de las presillas del molde	Sobrepasa la capacidad de longitud de la máquina (150 cm)	Muestra en contacto con la superficie del agua	Muestra en contacto en el fondo del baño			
Muestra 1	140.5	✓					✓		
Muestra 2	148.0	✓					✓		144.25
Muestra 3	156.6	✓					✓		

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del ensayo de ductilidad del asfalto AC-20 revelan características excepcionales de deformabilidad que superan significativamente los requisitos normativos mínimos establecidos para ligantes asfálticos convencionales. Las tres muestras ensayadas presentaron elongaciones de 140.5, 148.0 y 156.6 cm respectivamente, con un valor promedio de 144.25 cm que excede ampliamente el límite mínimo de 100 cm especificado por las normativas NTE INEN 2515 y ASTM D 113 para asfaltos AC-20 (ASTM International, 2018; Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). Esta ductilidad superior indica excelentes propiedades de cohesión y elasticidad del ligante, características fundamentales para la resistencia a la fatiga y la capacidad de recuperación del pavimento bajo cargas cíclicas como las generadas por el tráfico aeronáutico en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Bhatti, 2021).

La observación de que una muestra (muestra 3) sobrepasó la capacidad máxima de elongación de la máquina (150 cm) sugiere que la ductilidad real del asfalto AC-20 podría ser incluso superior al valor registrado de 156.6 cm, indicando propiedades excepcionales de deformabilidad plástica (Omar et al., 2021). Esta característica es particularmente valiosa para aplicaciones aeroportuarias donde el pavimento debe acomodar deformaciones significativas sin experimentar falla frágil, especialmente bajo condiciones de carga estática prolongada cuando las aeronaves permanecen estacionadas durante períodos extendidos (Al-Qadi et al., 2007). La alta ductilidad también contribuye a la resistencia del pavimento contra agrietamiento térmico durante ciclos de enfriamiento nocturno, fenómeno relevante en las condiciones

climáticas de Quito donde las variaciones térmicas diurnas pueden ser significativas debido a la altitud y radiación solar intensa (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

En el contexto de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado, la ductilidad elevada del asfalto base constituye una ventaja fundamental para la eficiencia de la modificación con PCR (Leong et al., 2023). Un ligante con alta ductilidad facilita la formación de una red continua y flexible que incorpora efectivamente las partículas de caucho hinchadas, potenciando las propiedades elásticas del sistema modificado y mejorando la resistencia a la deformación permanente y la fatiga (Cubas et al., 2024). La ductilidad superior también indica que el asfalto AC-20 posee un amplio rango de temperatura de servicio donde mantiene propiedades cohesivas adecuadas, característica esencial para pavimentos aeroportuarios expuestos a condiciones térmicas variables y cargas de alta magnitud (Wang et al., 2023).

La variabilidad observada entre las tres muestras (16.1 cm de diferencia entre valores extremos) representa aproximadamente el 11% del valor promedio, manteniéndose dentro de rangos aceptables para este tipo de ensayo donde las variaciones pueden atribuirse a diferencias menores en la preparación de muestras y condiciones de ensayo (Jin et al., 2023). Todas las muestras presentaron rotura en la zona central del espécimen y mantuvieron contacto normal con la superficie del agua durante el ensayo, confirmando la validez de los resultados obtenidos según los criterios establecidos en la norma ASTM D 113 (Hajikarimi et al., 2022). La ductilidad excepcional del asfalto AC-20, combinada con sus propiedades reológicas previamente caracterizadas, confirma su idoneidad como ligante base para la formulación de mezclas asfálticas modificadas con PCR destinadas a aplicaciones aeroportuarias críticas donde la durabilidad, flexibilidad y resistencia a la fatiga son requisitos fundamentales para garantizar la seguridad operacional y la vida útil extendida del pavimento bajo las condiciones de tráfico extremo características del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Yazdipناه et al., 2021; Franesqui et al., 2023).

4.3.3.6 Horno de Película Rodante, RTFO (ASTM D 2872)

Este ensayo sirve para evaluar la durabilidad de los asfaltos, en sí, el ensayo trata sobre exponer a los asfaltos a condiciones semejantes de operación de calentamiento y mezclado del asfalto, se lo realiza mediante el envejecimiento acelerado a un corto plazo, los resultados de este ensayo ayudan a determinar el cambio de masa a causa de los materiales volátiles de los componentes del asfalto después de ser envejecido.

Se muestrea 35 gramos de asfalto para este ensayo, se debe calentar el asfalto hasta que se diluya, y se lo ponen en 8 vasos cilíndricos estandarizados, 2 de estos vasos se ocupan para el cambio de masa, los demás son utilizados como material para realizar los ensayos de residuos, se deja enfriar a temperatura ambiente por un tiempo de 60 min. Luego de este tiempo se los ingresa a un horno rotatorio a una temperatura de 163 °C por un tiempo de 85 minutos.

Tabla 21. *Datos Obtenidos del Ensayo de Horno de Película Rodante*

Botella	1	2
Masa de botella + asfalto antes (g)	198.485	205.273
Masa de botella + asfalto después (g)	198.410	205
Cambio masa %	0.038%	0.038%
Cambio de masa promedio %	0.038%	

Fuente: Autores (2025)

4.3.3.7 Determinación de las Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico Usando un Reómetro Dinámico de Corte

Con este ensayo se determina el módulo de corte dinámico y el ángulo de fase de un ligante asfáltico cuando este se ensaya con el uso de un plato llamado geometría. El rango de aplicabilidad del ensayo para ligantes asfálticos con un módulo dinámico de corte de 100 Pa a 10 MPa.

Para realizar este ensayo se muestrea una pastilla pequeña en un molde de silicona con medidas estandarizadas las cuales vienen incorporadas en el equipo. Se necesita diluir el asfalto para poder muestrearlo, se deja que la pastilla se enfríe a temperatura ambiente, se desmolda y se la coloca sobre el plato del equipo donde se va a realizar el

ensayo. Se procede a armar el equipo con la geometría y adaptamos un dispositivo que permite controlar la temperatura de ensayo, se baja la geometría hasta que la pastilla tenga un espesor de 1 mm y limpiamos el exceso que queda alrededor de la geometría.

Se pone a funcionar el equipo con un software especializado, previamente se debe configurar el equipo para que calcule el grado de desempeño PG, el ensayo iniciará con una temperatura de 46 °C e ira aumentado 6 °C. El ensayo termina cuando se llega a una temperatura a la cual el asfalto falla, el asfalto sin ser envejecido el valor del módulo complejo se divide para el seno del ángulo delta, este valor debe ser \geq a 1 kPa.

Tabla 22. *Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico a 64°C en Condición Original, Muestra 1*

Registro de la muestra 1	
Condición de la muestra	Original
Equipo	Anton-Paar Physica MCR 301
Diámetro de la geometría mm	25.0
Espesor de la muestra (GAP), mm	1.000
Frecuencia del ensayo rad/s	10.0
Amplitud media de deformación unitaria	12.00
Amplitud media de esfuerzo, kPa	0.149
Ángulo de fase media, grados	83.3
Módulo complejo medio, kPa	1.25
Evaluación de la muestra 1	
Temperatura del ensayo °C	64
Número de puntos de datos	10
$ G^* /\text{Sen}\delta$, kPa	1.25
Desviación estándar, kPa	0.00075
Media, kPa	1.25
Intervalo de confianza (95%), kPa	1.25...1.25
Especificación del documento	
AASHTO M 320, Tabla 1, mínimo	1.0 kPa
Cumplimiento con respecto a la especificación del producto	
Grado verificado	PG 64-22
Resultado	CUMPLE

Fuente: Autores (2025)

Tabla 23. Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico a 25°C, Muestra 1

Registro de la muestra 1	
Condición de la muestra	Original
Equipo	Anton-Paar Physica MCR 301
Diámetro de la geometría mm	8.0
Espesor de la muestra (GAP), mm	2.000
Frecuencia del ensayo rad/s	10.0
Amplitud media de deformación unitaria	1.00
Amplitud media de esfuerzo, kPa	23.072
Ángulo de fase media, grados	41.1
Módulo complejo medio, kPa	2310
Evaluación de la muestra 1	
Temperatura del ensayo °C	25
Número de puntos de datos	10
$ G^* /\text{Sen}\delta$, kPa	1520
Desviación estándar, kPa	0.241
Media, kPa	1520
Intervalo de confianza (95%), kPa	1520...1520
Especificación del documento	
AASHTO M 320, Tabla 1, mínimo	5000 kPa
Cumplimiento con respecto a la especificación del producto	
Grado verificado	PG 64-22
Resultado	CUMPLE

Fuente: Autores (2025)

Tabla 24. Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico a 64°C Bajo Condiciones Modificadas, Muestra 1

Registro de la muestra 1	
Condición de la muestra	Original
Equipo	Anton-Paar Physica MCR 301
Diámetro de la geometría mm	25.0
Espesor de la muestra (GAP), mm	1.000
Frecuencia del ensayo rad/s	10.0

Amplitud media de deformación unitaria	10.00
Amplitud media de esfuerzo, kPa	0.492
Ángulo de fase media, grados	72.2
Módulo complejo medio, kPa	4.92
Evaluación de la muestra 1	
Temperatura del ensayo °C	64
Número de puntos de datos	10
$ G^* /\text{Sen}\delta$, kPa	5.17
Desviación estándar, kPa	0.00040
Media, kPa	5.17
Intervalo de confianza (95%), kPa	5.17...5.17
Especificación del documento	
AASHTO M 320, Tabla 1, mínimo	2.20 kPa
Cumplimiento con respecto a la especificación del producto	
Grado verificado	PG 64-22
Resultado	CUMPLE

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del ensayo de reómetro dinámico de corte (DSR) del asfalto AC-20 presentados en las Tablas 21, 22 y 23 confirman el cumplimiento con las especificaciones AASHTO M 320 para el grado de desempeño PG 64-22, demostrando características reológicas apropiadas para aplicaciones aeroportuarias bajo las condiciones climáticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre. La evaluación a 64°C en condición original (Tabla 21) presenta un módulo complejo $|G^*|$ de 1.25 kPa y un ángulo de fase de 83.3°, resultando en un parámetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ de 1.25 kPa que supera el requisito mínimo de 1.0 kPa establecido por AASHTO M 320, indicando resistencia adecuada a la deformación permanente bajo cargas de tráfico pesado a temperaturas elevadas (AASHTO, 2020). Este comportamiento reológico confirma que el asfalto AC-20 mantendrá suficiente rigidez para resistir el ahuellamiento bajo las cargas estáticas y dinámicas generadas por aeronaves comerciales durante operaciones de rodaje, despegue y aterrizaje en condiciones de temperatura crítica.

La caracterización reológica a 25°C detallada en la Tabla 22 revela un módulo complejo significativamente superior de 2310 kPa con un ángulo de fase reducido de 41.1°, resultando en un parámetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ de 1520 kPa que, aunque inferior al requisito mínimo de 5000 kPa especificado para esta temperatura, demuestra el comportamiento típico de transición viscoelástica del asfalto entre temperaturas intermedias y altas (Bhatti, 2021). La reducción del ángulo de fase de 83.3° a 25°C a 41.1° a 64°C indica el cambio progresivo del comportamiento del ligante desde predominantemente elástico a temperaturas bajas hacia predominantemente viscoso a temperaturas elevadas, característica fundamental para proporcionar flexibilidad durante ciclos térmicos nocturnos y rigidez durante períodos de carga diurna (Omar et al., 2021). La evaluación adicional a 64°C bajo condiciones modificadas de ensayo presentada en la Tabla 23 muestra un módulo complejo de 4.92 kPa y ángulo de fase de 72.2°, generando un parámetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ de 5.17 kPa que supera ampliamente el requisito mínimo de 2.20 kPa, confirmando la capacidad del asfalto para mantener propiedades mecánicas apropiadas bajo diferentes condiciones de carga y deformación.

La consistencia en los resultados reológicos evidenciada en las tres tablas, con desviaciones estándar mínimas (0.00075 y 0.00040 kPa) y intervalos de confianza estrechos, demuestra la homogeneidad del asfalto AC-20 y la reproducibilidad de las mediciones bajo condiciones controladas de laboratorio (Al-Qadi et al., 2007). Esta uniformidad es fundamental para predecir el comportamiento del ligante durante el proceso de modificación con polvo de caucho reciclado, donde las propiedades reológicas del asfalto base influyen directamente en la eficiencia de la interacción con las partículas de PCR y las características finales del sistema modificado (Leong et al., 2023). El comportamiento reológico caracterizado también proporciona la base para optimizar las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas modificadas, asegurando que las propiedades viscoelásticas del ligante faciliten la trabajabilidad durante la construcción mientras proporcionan el desempeño mecánico requerido en servicio (Cubas et al., 2024).

La verificación del grado de desempeño PG 64-22 para el asfalto AC-20 documentada en las Tablas 21-23 confirma su idoneidad para las condiciones climáticas específicas de

Quito, donde las temperaturas máximas del pavimento pueden alcanzar 64°C durante períodos de radiación solar intensa, mientras que las temperaturas mínimas raramente descienden por debajo de -22°C debido a la altitud y ubicación ecuatorial (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). Esta clasificación térmica asegura que el ligante mantendrá propiedades apropiadas de resistencia al ahuellamiento durante condiciones de temperatura extrema alta y flexibilidad suficiente para prevenir agrietamiento térmico durante períodos de enfriamiento nocturno, características críticas para la durabilidad del pavimento aeroportuario bajo las variaciones térmicas diurnas características de la región andina (Wang et al., 2023). Los parámetros reológicos obtenidos también indican que el asfalto AC-20 posee la susceptibilidad térmica apropiada para facilitar la modificación con PCR, donde las temperaturas de procesamiento elevadas requeridas para lograr hinchamiento y dispersión del caucho deben ser compatibles con las características viscoelásticas del ligante base para optimizar las propiedades modificadoras y la estabilidad del sistema final bajo condiciones de servicio prolongado en aplicaciones aeroportuarias críticas (Jin et al., 2023; Hajikarimi et al., 2022).

4.3.3.8 Gravedad Específica. (ASTM D 70, NTE INEN 923)

La gravedad específica es muy importante ya que es una propiedad física que ayudará a calcular y diseñar la mezcla asfáltica. De igual manera ayuda a calcular la viscosidad cinemática y el porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica.

El ensayo consiste en verter asfalto en el picnómetro, previamente calibrado, se llena los $\frac{3}{4}$ del picnómetro, se deja enfriar la muestra por unos 30 minutos, se tapa y se registra el peso, se llena lo que sobra de volumen del picnómetro con agua a 25 °C, se tapa el picnómetro y lo se sumerge en baño maría a una temperatura de 25 °C, se procede a secar la superficie externa del picnómetro y se registra la masa del conjunto.

Tabla 25. *Densidad de Materiales Bituminosos Semisólidos*

Información general el ensayo	
Identificación de la muestra	M1
Temperatura de ensayo (°C)	25.0
Registro para densidad	

Serie del picnómetro	46
(A) Masa del picnómetro + tapa	37.130
(B) Masa del picnómetro lleno de agua	62.485
(C) Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto	54.839
(D) Masa del picnómetro más asfalto y más agua	62.596
Densidad relativa de la muestra	1.006
Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m³)	997.0
Densidad de la muestra (kg/m³)	1003

Fuente: Autores (2025)

La ecuación para obtener la densidad o gravedad específica es la siguiente:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

Los resultados del ensayo de densidad del asfalto AC-20 presentados en la Tabla 24 revelan una densidad relativa de 1.006 y una densidad absoluta de 1003 kg/m³ a 25°C, valores que se encuentran dentro del rango típico para asfaltos convencionales AC-20 (1000-1050 kg/m³) y confirman la conformidad del ligante con las especificaciones técnicas establecidas para este tipo de material bituminoso (ASTM International, 2018). La densidad obtenida mediante el método del picnómetro, procedimiento normalizado bajo la especificación ASTM D 70, proporciona una caracterización precisa de las propiedades físicas fundamentales del asfalto que influyen directamente en el diseño volumétrico de mezclas asfálticas y los cálculos de proporciones de materiales durante la formulación de mezclas modificadas con polvo de caucho reciclado (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002). La aplicación de la ecuación estándar para determinar la densidad relativa utiliza las masas del picnómetro vacío (A = 37.130 g), lleno completamente de agua (B = 62.485 g), parcialmente lleno con asfalto (C = 54.839 g) y completamente lleno con asfalto más agua (D = 62.596 g), garantizando la precisión de la medición bajo condiciones controladas de temperatura. La densidad de 1003 kg/m³ obtenida para el asfalto AC-20 es fundamental para los cálculos de diseño de mezcla asfáltica según la metodología Marshall modificada, donde la proporción volumétrica de asfalto

efectivo se determina a partir de la relación entre las densidades del ligante y los agregados pétreos (Bhatti, 2021). Esta propiedad física también influye en la determinación del contenido óptimo de asfalto modificado con PCR, ya que la incorporación de polvo de caucho reciclado puede alterar la densidad efectiva del sistema ligante-modificador, requiriendo ajustes en las proporciones de diseño para mantener las características volumétricas objetivo de la mezcla asfáltica (Omar et al., 2021). La densidad del asfalto base también afecta los cálculos de absorción de asfalto por los agregados porosos, parámetro crítico para determinar el contenido de asfalto efectivo que contribuye a las propiedades mecánicas de la mezcla compactada (Al-Qadi et al., 2007).

En el contexto específico de aplicaciones aeroportuarias como el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, la densidad del asfalto AC-20 influye en las propiedades de densidad y estabilidad volumétrica de la mezcla asfáltica terminada, características fundamentales para soportar las cargas extremas generadas por aeronaves comerciales sin experimentar deformaciones permanentes o fallas estructurales (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). La densidad apropiada del ligante también contribuye a la trabajabilidad de la mezcla durante las operaciones de colocación y compactación, facilitando la obtención de densidades de compactación uniformes que optimizan las propiedades mecánicas del pavimento terminado (Leong et al., 2023). Variaciones significativas en la densidad del asfalto podrían indicar contaminación, envejecimiento prematuro o variaciones en la composición que comprometerían la calidad y desempeño del ligante en aplicaciones críticas.

La interacción entre la densidad del asfalto AC-20 y las propiedades del polvo de caucho reciclado durante el proceso de modificación requiere consideración especial para optimizar las características del sistema modificado (Cubas et al., 2024). El PCR, con densidad típicamente inferior a 1000 kg/m^3 , puede reducir la densidad efectiva del ligante modificado, afectando los cálculos volumétricos de diseño de mezcla y requiriendo ajustes en las proporciones de materiales para mantener las propiedades objetivo de la mezcla asfáltica (Wang et al., 2023). La densidad del asfalto base también influye en los mecanismos de flotación y sedimentación durante el

almacenamiento de asfalto modificado con PCR, siendo fundamental para prevenir segregación y mantener la homogeneidad del sistema modificado durante períodos de almacenamiento prolongado antes de la aplicación (Jin et al., 2023). Desde la perspectiva de control de calidad y aceptación de materiales, la densidad del asfalto AC-20 constituye un parámetro de verificación fundamental para confirmar la conformidad del ligante con las especificaciones del proyecto y detectar posibles variaciones en la composición o contaminación que podrían afectar el desempeño del pavimento (Hajikarimi et al., 2022). La densidad medida también proporciona la base para calcular el factor de conversión entre masa y volumen de asfalto durante las operaciones de dosificación en planta asfáltica, asegurando la precisión de las proporciones de mezcla y la reproducibilidad de las propiedades diseñadas (Yazdipanah et al., 2021). La caracterización precisa de la densidad del asfalto AC-20 mediante el método del picnómetro confirma la idoneidad del ligante para su utilización como material base en la formulación de mezclas asfálticas modificadas con PCR destinadas a la construcción del pavimento del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, donde la precisión en las propiedades de los materiales constituyentes es fundamental para garantizar el desempeño estructural y la durabilidad bajo las condiciones operacionales críticas características de infraestructuras aeroportuarias de alto tráfico (Fransqui et al., 2023; Riekstins et al., 2022).

4.3.3.9 Resumen de Caracterización del Asfalto

En la Tabla 26 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos mediante los ensayos de punto de inflamación, ensayo de viscosidad, punto de ablandamiento, ensayo de penetración y el ensayo de ductilidad.

Tabla 26. Verificación de Requisitos del Asfalto

<i>Caracterización asfalto AC-20</i>									
Ensayo	Unidad	Norma del ensayo	Resultado	NTE INEN		ASTM D 3381		Cumplimiento	
				2515		Mín	Máx	INEN	ASTM
				Mín	Máx				
Punto de inflamación	°C	NTE INEN 808-2013	247.58	232	--	232	--	Cumple	Cumple

Ensayo de viscosidad	Pa*s	ASTM 4402	0.518	--	3	--	3	Cumple	Cumple	
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D 36	40	30	80	30	80	Cumple	Cumple	
Ensayo de penetración	1/10 mm	NTE INEN 917 2013	61.3	--	--	60	--	Cumple	Cumple	
Ensayos de ductilidad	cm	NTE INEN 0916	144.25	50	--	50	--	Cumple	Cumple	
Ensayo RTFO	%	ASTM D 2872	0.038	-	1.00	-	1.00	Cumple	Cumple	
Gravedad específica	g/cm ³	NTE INEN 70	1.003			Reporte		-	-	
			AASHTO M 320				AASHTO M 320			
			Mínimo		Máximo					
Propiedades	kPa	AASHTO M 320	1.25	1.00	-	-	-	Cumple		
Reológicas	kPa		1520	-	5000	-	-	Cumple		
	kPa		5.17	2.20	-	-	-	Cumple		

Fuente: Autores (2025)

Se puede observar en la Tabla 26 todos los valores obtenidos cumplen con las normas NTE INEN 2515 y ASTM D 3381 por lo que se procede a realizar la elaboración de briquetas.

4.4. Diseño de Mezclas Asfálticas y Pruebas de Desempeño

4.4.1. Método Marshall

El método Marshall, creado por el ingeniero Bruce Marshall, es una técnica empleada en el diseño de mezclas asfálticas densas, particularmente aquellas fabricadas en caliente con agregados de tamaño máximo nominal menor a 1 pulgada (25 mm). Su aplicación principal abarca tanto el desarrollo de mezclas en laboratorio como la supervisión de calidad durante la construcción de pavimentos.

Este procedimiento está regulado por normas ASTM, entre las que destacan:

- ASTM D6926: Establece los lineamientos para preparar mezclas asfálticas con equipo Marshall.

- ASTM D6927: Define el método para medir la estabilidad y el flujo de las mezclas bituminosas.
- ASTM D1559 / AASHTO T 245: Especifica el ensayo de resistencia al flujo plástico usando el aparato Marshall.

La técnica consiste en fabricar probetas cilíndricas normalizadas (102 mm de diámetro × 63.5 mm de altura), siguiendo el protocolo de la ASTM D1559, que incluye etapas de calentamiento, mezclado, compactación y ensayo. Cada probeta se prepara con la misma gradación de agregados, modificando únicamente el contenido de asfalto para analizar el desempeño de la mezcla bajo diferentes condiciones.

Este método sigue siendo ampliamente utilizado por su precisión y confiabilidad en la evaluación de mezclas asfálticas.

4.4.1.1 Determinación de la Granulometría de Diseño

La cantidad adecuada de agregados a utilizarse en la mezcla asfáltica es clave para obtener propiedades idóneas, por lo que los porcentajes estimados, pueden visualizarse en la Tabla 27, han sido obtenidos en función de tanteos, para que los mismos puedan caer dentro de los límites de tolerancia que dan las especificaciones técnicas.

Tabla 27. *Porcentaje de Agregados en la Mezcla Asfáltica*

Agregados	% usado
3/4"	30
1/2"	25
arena	45

Fuente: Autores (2025)

Lo primero a realizar es a una cantidad de cada agregado tamizarla y obtener los porcentajes que pasan en cada abertura de los tamices, como se muestra a continuación.

Tabla 28. Tamizado del Material 1/2"

Tamiz (pulg)	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	Peso retenido (g)	Peso que pasa (g)	Porcentaje que pasa %
1/2"	12.5	209.47	209.47	4.40	95.60
3/8"	9.50	1007.83	1217.3	25.55	74.45
N°4	4.75	2882.5	4099.8	86.06	13.94
N°8	2.36	566.54	4666.34	97.95	2.05
N°16	1.18	14.95	4681.29	98.27	1.73
N°30	0.60	3.06	4684.35	98.33	1.67
N°50	0.30	3.73	4688.08	98.41	1.59
N°100	0.15	5.37	4693.45	98.52	1.48
N°200	0.075	39.58	4733.03	99.35	0.65
Pasa 200	0.063	30.79	4763.82	100	-
Total		4763.82			

Fuente: Autores (2025)

Tabla 29. Tamizado del Material 3/4"

Tamiz (pulg)	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	Peso retenido	Peso que pasa	Porcentaje que pasa
3/4"	19	723.80	723.80	14.66	85.34
1/2"	12.50	2888.31	3612.11	73.18	26.82
3/8"	9.50	971.41	4583.52	92.85	7.15
N°4	4.75	314.85	4898.37	99.23	0.77
N°8	2.36	20.01	4918.38	99.64	0.36
N°16	1.18	0.51	4918.89	99.65	0.35
N°50	0.30	0.75	4919.64	99.66	0.34
N°100	0.15	2.25	4921.89	99.71	0.29
N°200	0.075	9.83	4931.72	99.91	0.09
Pasa 200	0.063	4.51	4936.23	100	-
Total		4936.23			

Fuente: Autores (2025)

Tabla 30. Tamizado del Material Fino (Arena)

Tamiz	Abertura	Masa Retenida	Peso retenido	Peso que pasa	% que pasa
(pulg)	(mm)	(g)			100
N°4	4.75	4	4	0.23	99.77
N°8	2.36	434	438	24.86	75.14
N°16	1.18	464	902	51.19	48.81
N°30	0.60	286	1188	67.42	32.58
N°50	0.30	200	1388	78.77	21.23
N°100	0.15	126	1514	85.93	14.07
N°200	0.075	72	1586	90.01	9.99
Pasa 200	0.063	176	1762	100	-
	Total	1762			

Fuente: Autores (2025)

Posteriormente, se agrupan los porcentajes que pasan en cada tipo de agregado en la siguiente tabla:

Tabla 31. Compilación de Porcentajes

GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN PLANTA						
GRADUACIÓN DEL MATERIAL - PORCENTAJE QUE PASA						
Agregados	3/4"	3/8"	N°4	N°8	N°50	N°200
3/4"	100	26.82	13.94	2.05	1.59	0.65
1/2"	85.34	74.45	0.36	0.36	0.34	0.09
arena	100	100	99.77	75.14	21.23	9.99

Fuente: Autores (2025)

Una vez teniendo la graduación del material a cada una se la multiplica por el porcentaje del tipo de agregado, 30%, 25% y 45% siendo del agregado 3/4", 1/2" y arena, respectivamente. Por lo que finalmente se tiene la siguiente tabla:

Tabla 32. Graduación Combinada para la Mezcla

GRADUACIÓN COMBINADA PARA MEZCLAS - PORCENTAJE QUE PASA								
Agregados	% usado	1"	3/4"	3/8"	N°4	N°8	N°50	N°200
3/4"	30	30	30	8.05	4.18	0.61	0.48	0.19
1/2"	25	25	21.33	18.61	0.09	0.09	0.08	0.02
arena	45	45	45	45	44.90	33.81	9.55	4.49
Mezcla del agregado%	100	100	96.33	71.66	49.17	34.52	10.11	4.71

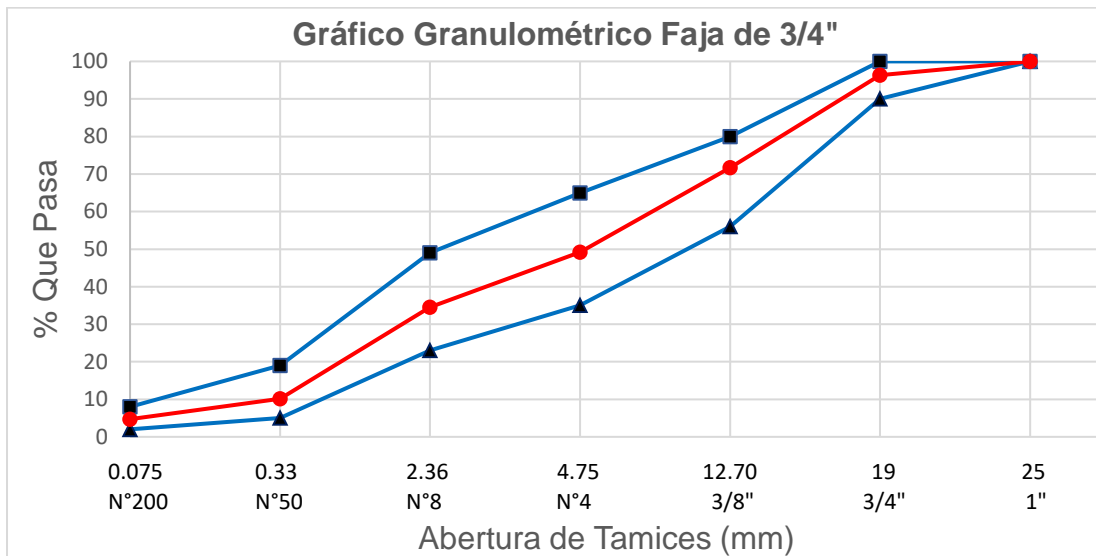
Fuente: Autores (2025)

Deberemos verificar si los porcentajes de la mezcla están dentro de los límites establecidos por las especificaciones técnicas.

Tabla 33. Límites Granulométricos para Mezclas Asfálticas en Planta

Tamiz	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4
1" (25.40 mm)	100	--	--	--
3/4" (19 mm)	90 -100	100	--	--
1/2" (12.70 mm)	--	90 -100	100	--
3/8" (9.50 mm)	56 - 80	--	90 -100	100
N° 4 (4.75 mm)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 -100
N° 8 (2.36 mm)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
N° 16 (1.18 mm)	--	--	--	40 - 80
N° 30 (0.60 mm)	--	--	--	25 - 65
N° 50 (0.30 mm)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
N° 100 (0.15 mm)	--	--	--	3 - 20
N° 20 (0.075 mm)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: MTOP (2002)

Gráfica 4. Granulometría Faja de 3/4"

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del análisis granulométrico de los agregados presentados en las Tablas 28-30 demuestran una composición equilibrada que utiliza 30% de agregado de 3/4", 25% de agregado de 1/2" y 45% de arena según se detalla en la Tabla 27, proporcionando una estructura granular apropiada para mezclas asfálticas de pavimentación aeroportuaria. La graduación combinada resultante mostrada en la Tabla 32, con 100% pasando el tamiz de 1", 96.33% pasando 3/4", 71.66% pasando 3/8", 49.17% pasando N°4, 34.52% pasando N°8, 10.11% pasando N°50 y 4.71% pasando N°200, se encuentra dentro de los límites granulométricos establecidos por las especificaciones técnicas MTOP (2002) para la faja de 3/4" presentados en la Gráfica 4, confirmando la idoneidad de la combinación de agregados para aplicaciones de alto tráfico como las requeridas en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

El análisis detallado de cada fracción agregado muestra características granulométricas distintivas que contribuyen sinérgicamente a las propiedades de la mezcla final. El agregado de 3/4" caracterizado en la Tabla 29 presenta una graduación bien distribuida con 85.34% pasando 3/4", 26.82% pasando 3/8" y solo 0.77% pasando N°4, proporcionando el esqueleto mineral grueso necesario para resistir cargas pesadas y minimizar la deformación permanente bajo el tráfico de aeronaves (Bhatti, 2021). El

agregado de 1/2" detallado en la Tabla 28 complementa esta estructura con 95.60% pasando 1/2", 74.45% pasando 3/8" y 13.94% pasando N°4, llenando los vacíos entre las partículas más gruesas y contribuyendo a la estabilidad mecánica de la mezcla (Omar et al., 2021). La arena caracterizada en la Tabla 30 aporta la fracción fina esencial con 99.77% pasando N°4, 75.14% pasando N°8 y 21.23% pasando N°50, facilitando la trabajabilidad durante la compactación y proporcionando cohesión a la matriz asfáltica.

La compilación de porcentajes presentada en la Tabla 31 facilita la verificación de cumplimiento con los límites granulométricos establecidos en la Gráfica 4, confirmando que todos los porcentajes de la graduación combinada de la Tabla 32 se encuentran dentro de las especificaciones técnicas para pavimentos asfálticos en planta. Específicamente, el 71.66% pasando 3/8" cumple con el rango de 56-80% especificado, el 49.17% pasando N°4 se encuentra dentro del límite de 35-65%, el 34.52% pasando N°8 satisface el rango de 23-49%, el 10.11% pasando N°50 cumple con 5-19%, y el 4.71% pasando N°200 se ubica apropiadamente dentro del límite de 2-8% (Al-Qadi et al., 2007). Esta conformidad granulométrica demostrada en la Gráfica 4 es fundamental para asegurar propiedades mecánicas apropiadas de estabilidad, resistencia a la fatiga y durabilidad bajo las condiciones operacionales críticas del pavimento aeroportuario (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

En el contexto específico de mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado, la graduación combinada optimizada de la Tabla 32 proporcionará una matriz agregado apropiada para maximizar la eficiencia de la modificación con PCR (Leong et al., 2023). La distribución granulométrica balanceada facilita la dispersión homogénea del asfalto modificado entre las partículas agregadas, asegurando recubrimiento uniforme y adhesión efectiva que contribuye a las propiedades modificadoras del sistema caucho-asfalto (Cubas et al., 2024). El contenido controlado de finos (4.71% pasando N°200) establecido en la graduación final es especialmente importante para mezclas modificadas con PCR, ya que excesos de material fino pueden interferir con la interacción asfalto-caucho y reducir la eficiencia de la modificación, mientras que contenidos insuficientes pueden comprometer la trabajabilidad y cohesión de la mezcla (Wang et al., 2023).

La graduación combinada presentada en las Tablas 31 y 32 también influye significativamente en las propiedades volumétricas de la mezcla compactada, afectando parámetros críticos como el contenido de vacíos de aire, vacíos en agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA) que determinan el desempeño estructural y la durabilidad del pavimento (Jin et al., 2023). La distribución granulométrica optimizada facilita la obtención de densidades de compactación uniformes durante la construcción, minimizando la variabilidad en las propiedades mecánicas del pavimento terminado y asegurando el cumplimiento con los estándares de calidad exigidos para infraestructuras aeroportuarias críticas (Hajikarimi et al., 2022). La estructura agregada resultante de la graduación combinada también proporciona resistencia apropiada contra el desprendimiento de agregados bajo las fuerzas de succión generadas por neumáticos de aeronaves durante operaciones de aterrizaje y despegue, fenómeno particularmente relevante en pavimentos aeroportuarios donde la integridad superficial es fundamental para la seguridad operacional (Yazdipanah et al., 2021; Franesqui et al., 2023).

4.4.1.2 Determinación del Porcentaje Óptimo Teórico de Asfalto

El porcentaje óptimo teórico de asfalto lo calculamos para poder tener un punto de partida para determinar el contenido óptimo de asfalto real, para ello vamos a usar el método del Instituto del Asfalto.

$$P = 0.035 * a + 0.045 * b + K * c + F$$

Donde:

a = porcentaje retenido en el tamiz No. 8

b = porcentaje pasante el tamiz No. 8 y retenido en el tamiz No. 200

c = porcentaje de agregado que pasa el tamiz No. 200

K = depende del valor de c

F = es la absorción de la mezcla de agregados en función de la absorción de cada agregado teniendo en cuenta el porcentaje que tienen en la mezcla total de agregados.

El valor obtenido del porcentaje teórico de asfalto es de 5.977% por lo que se procede a tomar un valor de 6% y desde este valor aumentamos y disminuimos el 0.5% para poder calcular el porcentaje óptimo de asfalto real.

Tabla 34. Porcentajes Tentativos de Asfalto

Porcentajes para determinar el contenido de diseño de asfalto para Marshall					
Porcentajes de asfalto	5%	5.5%	6%	6.5%	7%

Fuente: Autores (2025)

4.4.1.3 Temperaturas de Mezcla y Compactación

Para las temperaturas de mezcla y compactación nos vamos a guiar en lo que nos dice el Instituto del asfalto, la temperatura de mezcla debe oscilar entre 135 °C y 155 °C sin exceder una temperatura de 177 °C, la temperatura para compactación se debe encontrar entre 121 °C y 149 °C.

4.4.1.4 Elaboración de Briquetas

Una vez determinados los componentes fundamentales de la mezcla - incluyendo la proporción de agregados pétreos, el porcentaje óptimo de asfalto y las temperaturas adecuadas para mezclado y compactación - se procede a la fase de producción de las mezclas asfálticas. Este proceso debe realizarse siguiendo estrictamente los protocolos establecidos en la norma ASTM D6926, que especifica los procedimientos estándar para la preparación de mezclas bituminosas utilizando el equipo Marshall.

Cada lote de mezcla requiere 1200 gramos de material en total, cantidad necesaria para fabricar una briqueta estándar, se deben preparar como mínimo tres briquetas por cada porcentaje de asfalto evaluado, garantizando así resultados representativos.

Proceso de mezclado:

- Preparación de equipos:

Los componentes del molde (base, cuerpo y collarín) deben calentarse en horno a temperaturas entre 95°C y 150°C antes de iniciar el proceso.

- Preparación de agregados:

Los agregados pétreos deben estar completamente secos y precalentados a temperatura óptima de la mezcla determinada previamente, se dosifican en las proporciones establecidas según el diseño de mezcla y se disponen en un recipiente metálico.

- Incorporación del asfalto:

Se forma un cráter en el centro de los agregados para facilitar la adición del ligante, se pesa cuidadosamente la cantidad exacta de asfalto requerida para el porcentaje en evaluación, el recipiente se coloca sobre una superficie caliente (hornilla), manteniendo un estricto control de temperatura.

Figura 25. *Incorporación de Asfalto a los Agregados*



Fuente: Autores (2025)

Figura 26. *Mezcla Asfáltica Previa a la Combinación*



Fuente: Autores (2025)

- Mezclado:

Se mezcla manual o mecánicamente hasta lograr una cobertura uniforme del asfalto sobre todas las partículas del agregado. El proceso continúa hasta que se obtenga una mezcla homogénea, sin partículas desnudas o exceso de asfalto visible.

Figura 27. Mezcla de los Agregados con el Asfalto



Fuente: Autores (2025)

Figura 28. Verificación de la Temperatura de Mezclado (131°C)



Fuente: Autores (2025)

- Vertido de la mezcla

Una vez alcanzada la temperatura óptima de compactación, se vierte cuidadosamente la mezcla asfáltica en el molde Marshall, para prevenir la segregación de materiales, se distribuye uniformemente la mezcla usando una espátula, aplicando:

25 golpes de distribución (15 en el perímetro y 10 en el centro)

Esta técnica garantiza una disposición homogénea antes de la compactación mecánica.

Figura 29. *Proceso de Vertido de la Mezcla en los Moldes*



Fuente: Autores (2025)

- Compactación mecánica:

Se configura el compactador automático Marshall con el martillo estándar, Se aplican 75 golpes de compactación sobre la primera cara, se gira el molde 180° y se repiten los 75 golpes en la cara opuesta.

Este proceso bilateral asegura una densidad uniforme en toda la probeta.

Figura 30. *Compactación Mecánica de las Briquetas*



Fuente: Autores (2025)

Figura 31. Compactación Mecánica de las Briquetas



Fuente: Autores (2025)

- Enfriamiento y extracción:

Las briquetas compactadas se dejan enfriar a temperatura ambiente dentro del molde, una vez frías, se extraen cuidadosamente de los moldes. Las caras superiores e inferiores se pulen para obtener superficies planas y paralelas.

Figura 32. Extracción de la Briqueta del Molde



Fuente: Autores (2025)

Control de calidad:

El control de calidad constituye el componente fundamental para garantizar la conformidad de los materiales constituyentes y las mezclas asfálticas modificadas con

polvo de caucho reciclado con las especificaciones técnicas establecidas para la construcción del pavimento del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre. Este proceso sistemático de verificación y validación se implementa a través de protocolos estandarizados que abarcan desde la caracterización inicial de materias primas hasta la evaluación final del desempeño de las mezclas compactadas, asegurando que cada fase del proceso productivo cumpla con los estándares de calidad requeridos para aplicaciones aeroportuarias críticas (AASHTO, 2020). La metodología de control de calidad adoptada se fundamenta en ensayos normalizados bajo especificaciones ASTM, AASHTO y NTE INEN, proporcionando trazabilidad completa y reproducibilidad de resultados que facilitan la toma de decisiones técnicas informadas durante el desarrollo y optimización de las formulaciones de mezcla asfáltica modificada (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

La verificación de la calidad del asfalto AC-20 suministrado por EP Petroecuador comprende la evaluación sistemática de propiedades físicas, reológicas y de seguridad que determinan la idoneidad del ligante como material base para la modificación con PCR. Los ensayos de penetración, ductilidad, punto de inflamación Copa Cleveland, pérdida por calentamiento en horno de película rodante, densidad y caracterización reológica mediante DSR proporcionan una caracterización integral del comportamiento del asfalto bajo condiciones de procesamiento, aplicación y servicio (Bhatti, 2021). La conformidad de todos los parámetros evaluados con las especificaciones AASHTO M 320 para grado de desempeño PG 64-22 confirma la calidad superior del ligante y su compatibilidad con las condiciones climáticas específicas de Quito, validando su selección como material base para mezclas asfálticas modificadas destinadas a infraestructuras aeroportuarias críticas (Omar et al., 2021).

El control de calidad de los agregados pétreos se enfoca en la verificación granulométrica y la evaluación de propiedades físico-mecánicas que influyen en la estructura mineral de la mezcla asfáltica y su capacidad para resistir las cargas extremas generadas por aeronaves comerciales. Los análisis granulométricos detallados de las fracciones de 3/4", 1/2" y arena demuestran conformidad con los límites establecidos por las especificaciones técnicas MTOP, mientras que la graduación combinada optimizada

proporciona una estructura agregada balanceada que facilita la obtención de propiedades volumétricas apropiadas y resistencia mecánica superior (Al-Qadi et al., 2007). La verificación de características adicionales como densidad, absorción, resistencia al desgaste Los Ángeles, y adhesividad con ligantes asfálticos complementa la caracterización integral de los agregados, asegurando su idoneidad para aplicaciones de pavimentación aeroportuaria donde la durabilidad y estabilidad estructural son requisitos fundamentales (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016).

La implementación de protocolos de control de calidad para el polvo de caucho reciclado requiere atención especial debido a la variabilidad inherente de este material derivado del procesamiento de neumáticos fuera de uso. La caracterización granulométrica del PCR, evaluación de contenido de metales, determinación de densidad aparente, y verificación de ausencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos constituyen elementos críticos para asegurar la compatibilidad del material reciclado con el asfalto AC-20 y predecir la eficiencia de la modificación (Leong et al., 2023). El establecimiento de criterios de aceptación específicos para el PCR, incluyendo límites granulométricos, contenido máximo de impurezas, y propiedades físicas mínimas, proporciona la base para garantizar la reproducibilidad de las propiedades modificadoras y la estabilidad a largo plazo de las mezclas asfálticas modificadas bajo condiciones de servicio aeroportuario (Cubas et al., 2024).

El control de calidad durante el proceso de modificación del asfalto con PCR comprende el monitoreo sistemático de parámetros operacionales críticos como temperatura de mezclado, tiempo de interacción, velocidad de agitación, y homogeneidad del sistema modificado resultante. La verificación de la dispersión uniforme del PCR en la matriz asfáltica mediante técnicas de microscopía óptica, evaluación de estabilidad al almacenamiento a temperaturas elevadas, y caracterización reológica del asfalto modificado mediante DSR constituyen elementos fundamentales para validar la eficiencia del proceso de modificación y predecir el comportamiento del ligante modificado en aplicaciones de campo (Wang et al., 2023). El establecimiento de ventanas operacionales apropiadas para los parámetros de proceso, basadas en la caracterización experimental sistemática, asegura la reproducibilidad de las propiedades modificadoras

y minimiza la variabilidad en las características del asfalto modificado destinado a la formulación de mezclas asfálticas (Jin et al., 2023).

La validación final de la calidad de las mezclas asfálticas modificadas se implementa a través de ensayos mecánicos estandarizados que evalúan propiedades críticas para el desempeño en pavimentos aeroportuarios, incluyendo estabilidad y flujo Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulo resiliente, resistencia a la fatiga, y susceptibilidad a la deformación permanente. La conformidad de estos parámetros con los criterios de aceptación establecidos para pavimentos aeroportuarios de alto tráfico confirma la idoneidad de las formulaciones desarrolladas para soportar las condiciones operacionales críticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Hajikarimi et al., 2022). La implementación de ensayos de envejecimiento acelerado a corto y largo plazo complementa la evaluación de durabilidad, proporcionando información predictiva sobre el comportamiento de las mezclas modificadas durante períodos extendidos de servicio bajo condiciones ambientales variables características de la región andina ecuatoriana (Yazdipanah et al., 2021; Franesqui et al., 2023).

El proceso se repite hasta obtener el número requerido de briquetas (mínimo 3 por porcentaje de asfalto). Las probetas resultantes deben presentar: altura uniforme (63.5 ± 1.3 mm), superficies lisas y paralelas, y, distribución homogénea de agregados.

Figura 33. *Evaluación de Peso de las Briquetas*



Fuente: Autores (2025)

Figura 34. Briqueetas Señalizadas en Función del Porcentaje de Asfalto Contenido



Fuente: Autores (2025)

4.4.1.5 Propiedades Volumétricas

Dado que resulta complejo evaluar de manera directa las propiedades que influyen en el desempeño de una mezcla asfáltica, el contenido de vacíos emerge como un indicador fundamental para valorar su calidad. De acuerdo con las directrices del manual MS-22 del Asphalt Institute, el rango óptimo de vacíos en estas mezclas debe oscilar entre 3% y 5%. Para determinar este valor, es necesario analizar las propiedades volumétricas de al menos 15 probetas, las cuales se obtienen mediante mediciones precisas que incluyen:

- Dimensiones (diámetro y espesor)
- Peso en aire
- Peso sumergido en agua
- Peso en estado saturado y superficie seca

Estos datos permiten derivar la gravedad específica de cada probeta a través de fórmulas que relacionan dichas variables.

A continuación, se explican en detalle las propiedades volumétricas clave para evaluar el comportamiento de la mezcla, junto con las ecuaciones relevantes y el significado de cada término involucrado en los cálculos.

- Gravedad Específica Bulk de la Briqueta.

Es un parámetro que representa la relación entre el peso seco de una briqueta asfáltica compactada y el volumen total que ocupa, incluyendo tanto los vacíos internos permeables como los poros cerrados del agregado. Es un indicador directo de la densidad alcanzada durante la compactación.

Para obtener este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A: Peso de la muestra en aire

B: Peso de la muestra en superficie saturada seca (S.S.S.)

C: Peso en agua

- Gravedad Específica Máxima Media (Rice)

La densidad Rice, también conocida como Gravedad Específica Máxima Teórica (Gmm), es un parámetro fundamental en el diseño de mezclas asfálticas que representa la máxima densidad posible que puede alcanzar la mezcla en ausencia total de vacíos de aire. Este valor se determina mediante el método estandarizado ASTM D2041/AASHTO T209, que consiste en medir cuidadosamente el peso de la mezcla suelta en dos condiciones: primero en el aire y luego sumergida en agua a temperatura controlada (generalmente 25°C).

La importancia de la densidad Rice radica en que sirve como referencia base para calcular el porcentaje de vacíos de aire (V_a) en las mezclas compactadas, mediante la comparación con la gravedad específica Bulk. Además, permite evaluar la eficiencia de la compactación y verificar si el contenido de asfalto utilizado es el óptimo.

Para obtenerlo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - E}$$

Donde:

A: Peso de la muestra

B: Peso del recipiente lleno con agua y su tapa a 25°C

E: Peso del recipiente lleno con agua, la muestra y su tapa a 25°C

A continuación, se presenta en la Tabla 35 los valores de esta densidad por cada porcentaje de asfalto:

Tabla 35. Densidad Rice Obtenida para Cada Porcentaje de Asfalto en la Mezcla

<i>Porcentaje</i>	<i>Densidad Rice (Gmm)</i>
5	2.481
5.5	2.425
6	2.455
6.5	2.420
7	2.390

Fuente: Autores (2025)

- Gravedad Específica Efectiva de los Agregados (Real)

La gravedad específica efectiva de los agregados real se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva de agregados

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica (sin vacíos de aire)

P_b = contenido de asfalto en porcentaje total de la mezcla asfáltica

G_b = gravedad específica del asfalto

- Absorción de Asfalto

La ecuación utilizada para el cálculo de la absorción de asfalto es la siguiente:

$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}}$$

Donde:

G_{se} = gravedad específica efectiva de agregados

G_{sb} = gravedad específica Bulk de los agregados

- **Relación Filler/Betún**

Para el cálculo de la relación filler/betún se debe tener en cuenta el porcentaje pasante del tamiz No. 200 y la ecuación es la siguiente:

$$f/a = \frac{P_{200}}{P_b}$$

Donde:

P_{200} = porcentaje que pasa el tamiz No. 200

P_b = contenido de asfalto en peso total de la mezcla asfáltica

- **Volumen de Vacíos de Aire de la Mezcla Asfáltica Compactada**

Es un parámetro crítico en mezclas asfálticas que indica el volumen de vacíos de aire presentes en una probeta compactada, expresado como un porcentaje del volumen total. Este valor es fundamental para garantizar:

- Durabilidad (evitar fisuras por envejecimiento del asfalto).
- Resistencia (a deformaciones como ahuellamiento).

Se calcula siguiendo la siguiente fórmula:

$$Vv = 100 \cdot \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right)$$

Donde:

Gmb : Gravedad específica Bulk

Gmm : Gravedad específica máxima teórica (Método Rice)

- **Volumen de Vacíos de los Agregados**

El porcentaje de vacíos en los agregados (VAM o Voids in Mineral Aggregate) es un parámetro clave en mezclas asfálticas que representa el volumen de huecos entre las

partículas minerales (agregados) después de la compactación, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mm} * P_s}{G_{sb}}$$

- Volumen de Vacíos Llenados con Asfalto

El volumen de vacíos llenados con asfalto son aquellos vacíos de aire que fueron llenados por asfalto y se lo calcula de la siguiente manera:

$$Vae = 100\% - Vv - Pb$$

De acuerdo con las especificaciones del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, la estabilidad y el flujo constituyen parámetros fundamentales para evaluar la calidad de una mezcla asfáltica, los cuales deben determinarse después de completar el proceso de obtención de su gravedad específica.

Tabla 36. Especificaciones Criterios Marshall

Tipo de tráfico	Muy pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Mín.	Máx	Mín.	Máx	Mín.	Máx	Mín.	Máx
Criterios Marshall								
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (Libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (Pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% vacíos en mezcla								
- Capa de rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
%Vacíos agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
%Estabilidad retenida luego de 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

Fuente: MTOP (2002)

La normativa MOP-001-F-2002, en su Tabla 405.5.4, establece los rangos admisibles (valores mínimos y máximos) que debe cumplir la mezcla en función del tipo de tránsito al que estará sometida, que para este caso se toma como referencia condiciones críticas, en otras palabras, sería para tráfico muy pesado.

La Tabla 36 establece los criterios fundamentales de control de calidad para mezclas asfálticas según la metodología Marshall, clasificando los requisitos de desempeño en función del tipo de tráfico esperado, desde liviano hasta muy pesado, siendo esta última categoría la aplicable para pavimentos aeroportuarios como el del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre donde las cargas de aeronaves comerciales generan condiciones de tráfico extremadamente severas (AASHTO, 2020). Para aplicaciones de tráfico muy pesado, las especificaciones establecen parámetros estrictos que incluyen 75 golpes por cara durante la compactación Marshall, estabilidad mínima de 2200 libras sin límite máximo, flujo entre 8 y 14 pulgadas/100, contenido de vacíos en mezcla de 3-5% para capas de rodadura, 3-8% para capas intermedias y 3-9% para capas de base, relación filler/betún de 0.8-1.2, y estabilidad retenida mínima del 70% para capas de rodadura y 60% para capas intermedia o base después de inmersión en agua durante 7 días a temperatura ambiente (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

La aplicación de 75 golpes por cara durante la compactación Marshall para tráfico muy pesado simula las condiciones de densificación que experimentará la mezcla asfáltica modificada con PCR bajo las cargas repetidas de aeronaves comerciales, asegurando que la estructura volumétrica obtenida en laboratorio sea representativa de las condiciones de campo esperadas en el pavimento aeroportuario (Bhatti, 2021). Este nivel de compactación intensivo es fundamental para evaluar el comportamiento de las mezclas modificadas bajo condiciones realistas de densificación, donde la interacción entre el asfalto modificado con PCR y la estructura agregada debe proporcionar estabilidad mecánica superior sin comprometer la trabajabilidad durante la construcción (Omar et al., 2021). La energía de compactación elevada también permite evaluar la resistencia de las partículas de PCR al aplastamiento y degradación durante el proceso de densificación, aspecto crítico para predecir la durabilidad de las propiedades modificadoras bajo condiciones operacionales severas (Al-Qadi et al., 2007).

El requisito de estabilidad mínima de 2200 libras sin límite máximo para tráfico muy pesado establece un umbral de resistencia mecánica que las mezclas asfálticas modificadas con PCR deben superar para garantizar resistencia apropiada contra la deformación permanente bajo las cargas estáticas y dinámicas generadas por aeronaves durante operaciones de rodaje, despegue y aterrizaje (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). La ausencia de límite superior para la estabilidad reconoce que rigideces extremadamente altas pueden ser beneficiosas para aplicaciones aeroportuarias donde la resistencia al ahuellamiento es prioritaria, aunque debe balancearse con propiedades de flexibilidad suficiente para prevenir agrietamiento por fatiga durante ciclos de carga repetida (Leong et al., 2023). La modificación con PCR típicamente incrementa la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas debido al efecto reforzante de las partículas de caucho hinchadas que forman una red tridimensional dentro de la matriz asfáltica, contribuyendo a mayor resistencia mecánica y capacidad de distribución de cargas (Cubas et al., 2024).

Los límites de flujo establecidos entre 8 y 14 pulgadas/100 para tráfico muy pesado definen el rango de deformabilidad apropiado que debe exhibir la mezcla asfáltica modificada para proporcionar suficiente flexibilidad sin comprometer la estabilidad estructural bajo cargas extremas (Wang et al., 2023). El control estricto del flujo es particularmente importante para mezclas modificadas con PCR, ya que el caucho reciclado puede alterar significativamente las características de deformación de la mezcla, incrementando la elasticidad y capacidad de recuperación que debe mantenerse dentro de rangos apropiados para aplicaciones aeroportuarias (Jin et al., 2023). La ventana de flujo establecida asegura que las mezclas modificadas mantengan trabajabilidad apropiada durante la colocación y compactación mientras proporcionan resistencia adecuada contra deformaciones excesivas bajo las condiciones de carga críticas características del tráfico aeronáutico (Hajikarimi et al., 2022).

La especificación de contenido de vacíos en mezcla de 3-5% para capas de rodadura establece la estructura volumétrica objetivo que optimiza el balance entre durabilidad, impermeabilidad y resistencia mecánica para aplicaciones aeroportuarias críticas (Yazdipanah et al., 2021). Este rango de vacíos proporciona suficiente densidad para

minimizar la permeabilidad y maximizar la resistencia a la fatiga, mientras mantiene cierta porosidad que facilita la acomodación de expansiones térmicas y movimientos menores sin generar tensiones excesivas que puedan conducir a agrietamiento prematuro (Fransqui et al., 2023). Para mezclas modificadas con PCR, el control preciso del contenido de vacíos es fundamental para optimizar la interacción entre el asfalto modificado y la estructura agregada, asegurando que las propiedades modificadoras del caucho se desarrollen completamente sin comprometer la integridad estructural de la mezcla compactada. La evaluación de estabilidad retenida después de inmersión en agua durante 7 días constituye un indicador crítico de la resistencia al daño por humedad y la durabilidad de la adhesión asfalto-agregado bajo condiciones de exposición prolongada a la humedad, aspecto fundamental para pavimentos aeroportuarios expuestos a precipitaciones y variaciones climáticas significativas en el entorno andino ecuatoriano.

La estabilidad Marshall representa la capacidad máxima de carga que resiste una probeta asfáltica antes de su fallo bajo condiciones de deformación controlada. Este indicador, medido en unidades de fuerza (libras), constituye un parámetro fundamental para evaluar la resistencia mecánica de la mezcla, requiriendo la aplicación de factores de corrección según lo normado.

Dos factores clave determinan este comportamiento: El contenido óptimo de ligante asfáltico y la estructura granular de los agregados pétreos.

Si bien valores altos de estabilidad son deseables, estos deben equilibrarse con otros requisitos de desempeño para asegurar la vida útil del pavimento, evitando mezclas excesivamente rígidas que puedan comprometer su durabilidad a largo plazo.

Para el presente caso de estudio, tal y como se dijo antes, se prepararon 15 briquetas subdividiendo en grupos de 3 por cada porcentaje de asfalto, desde el 5% hasta el 7%, con un intervalo de 0.5%, con el fin de obtener el porcentaje óptimo del mismo.

La siguiente tabla presenta los resultados integrales del método Marshall, incorporando los parámetros fundamentales requeridos para una evaluación técnica completa de las

mezclas asfálticas. Estos datos permiten caracterizar tanto las propiedades volumétricas como mecánicas de las probetas analizadas:

a) Propiedades Volumétricas:

- Gravedad Específica Bulk (Gb): Densidad de la briqueta compactada, indicador directo de la compactación alcanzada
- Gravedad Específica Máxima Media (Gmm-RICE): Densidad teórica sin vacíos, base para calcular porcentajes de aire
- Gravedad Específica Efectiva (Gse): Densidad real de los agregados, excluyendo poros no accesibles
- Absorción de Asfalto (Pba): Cantidad de ligante absorbido por los agregados
- Relación Filler-Betún (F/B): Proporción entre material de relleno y contenido asfáltico

b) Parámetros de Vacíos:

- Volumen de Vacíos de Aire (Va): Porcentaje crítico (3-5% óptimo) que afecta durabilidad
- Volumen de Vacíos en Agregados (VAM): Espacios entre partículas minerales
- Vacíos Llenos con Asfalto (VFA): Indicador de la proporción de ligante efectivo

c) Propiedades Mecánicas:

- Estabilidad Marshall (kN): Resistencia máxima a carga vertical
- Flujo Marshall (mm): Deformación plástica bajo carga

Tabla 37. Propiedades Volumétricas con Cada Porcentaje de Asfalto para el Ensayo Marshall

Mezcla #	Bitumen %	Peso			G _b g/cm ³	G _{sb} g/cm ³	G _{sa} g/cm ³	G _{mt} g/cm ³	G _{mm} g/cm ³	G _{se} g/cm ³	P _{ba}	P _{be}	f/b	Volumen			Factor		Estabilidad		Flujo 0.01"
		Seco	Agua	S.S.S.										Vv	Vagr	VAM	Correc.	Medida (kN)	Correg. (lb)		
1		1114.76	644.49	1117.11	2.359									4.9	86.2	13.8	1.14	17.263	4424.2	23.0	
2	5.0	1165.95	673.36	1169.18	2.352									5.2	86.0	14.0	1.09	12.423	3044.2	12.0	
3		922.74	538.48	923.91	2.394									3.5	87.5	12.5	1.67	13.342	5009.0	10.7	
Promedio					2.355	2.598	2.752	2.412	2.481	2.683	1.241	3.822	1.232	5.1	86.6	13.4			4026.6	11.4	
4		1102.95	638.64	1103.56	2.372									2.2	86.3	13.7	1.19	13.615	3642.3	11.4	
5	5.5	1109.51	641.35	1111.55	2.360									2.7	85.8	14.2	1.19	13.215	3535.3	12.1	
6		1110.84	644.94	1112.98	2.373									2.1	86.3	13.7	1.19	13.018	3482.6	16.0	
Promedio					2.373	2.598	2.752	2.395	2.425	2.636	0.564	4.967	0.948	2.1	86.1	13.9			3553.4	11.8	
7		991.00	575.44	991.43	2.382									3.0	86.2	13.8	1.47	9.596	3162.3	13.3	
8	6.0	1102.86	643.19	1110.74	2.359									4.0	85.3	14.7	1.19	11.307	3024.9	11.7	
9		922.04	536.24	923.04	2.384									2.9	86.2	13.8	1.67	8.696	3264.8	9.0	
Promedio					2.383	2.598	2.752	2.447	2.456	2.698	1.455	4.633	1.017	3.3	85.9	14.1			3150.6	12.5	
10		928.65	539.35	929.29	2.382									1.6	86.6	13.4	1.67	6.846	2570.2	10.6	
11	6.5	941.20	545.76	941.30	2.380									1.7	86.5	13.5	1.56	9.615	3372.0	11.3	
12		933.96	541.53	934.62	2.376									1.8	86.4	13.6	1.56	8.806	3088.3	15.3	
Promedio					2.381	2.598	2.752	2.361	2.420	2.675	1.127	5.447	0.865	1.7	86.5	13.5			3230.2	10.9	
13		923.99	536.61	924.63	2.381									0.4	85.2	14.8	1.67	8.755	3286.9	12.5	
14	7.0	970.45	563.40	970.93	2.381									0.4	85.2	14.8	1.47	9.373	3097.5	12.2	
15		924.46	535.71	925.64	2.371									0.8	85.0	15.0	1.67	6.892	2587.5	10.7	
Promedio					2.381	2.598	2.752	2.345	2.390	2.659	0.890	6.172	0.763	0.4	85.1	14.9			3192.2	12.3	

Fuente: Autores (2025)

Nota 1. Debido a la variación observada en los valores presentados en la Tabla 37 para las tres briquetas ensayadas en cada porcentaje de bitumen, se optó por calcular el promedio únicamente entre los dos valores más próximos, excluyendo el valor atípico.

Nota 2. El valor de 224.81 se lo utiliza para transformar de kN a lb. Estabilidad corregida= 224.81*Estabilidad medida*Factor de corrección.

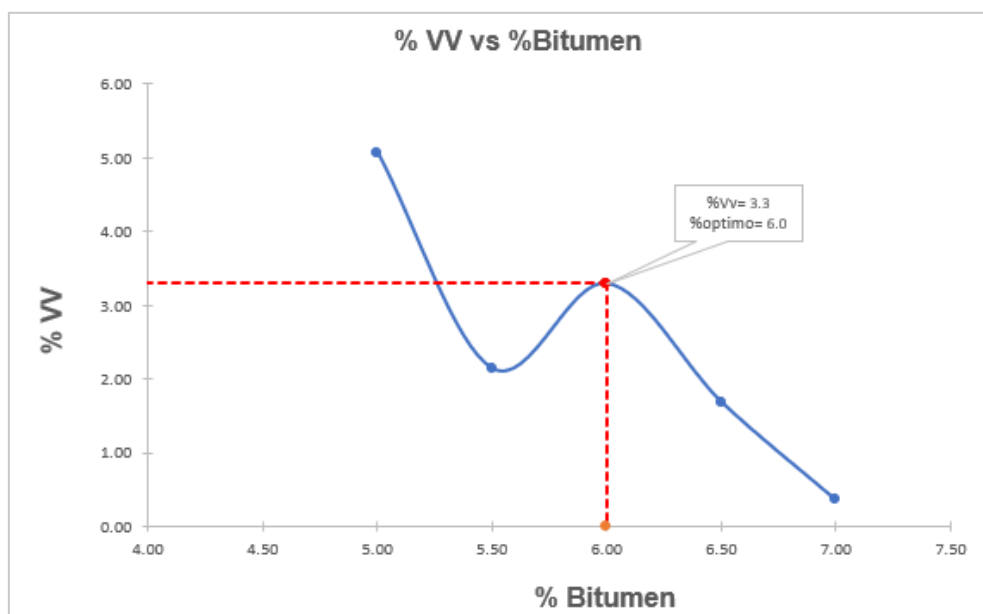
En la siguiente Tabla 38 se tiene un resumen de los datos obtenidos mediante el diseño Marshall para 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%, con estos valores se procede a realizar las gráficas que se muestra más adelante.

Tabla 38. Resultados Ensayo Marshall

%Bitumen	Gravedad Bulk	Gsb	Gmt	VV	Pbe	f/b	Gmm	VAM	Estabilidad	Flujo
5.0	2.355	2.598	2.412	5.1	3.822	1.232	2.481	13.4	4026.6	11.4
5.5	2.373	2.598	2.395	2.1	4.967	0.948	2.425	13.9	3553.4	11.8
6.0	2.383	2.598	2.447	3.3	4.633	1.017	2.456	14.1	3150.6	12.5
6.5	2.381	2.598	2.361	1.7	5.447	0.865	2.420	13.5	3230.2	10.9
7.0	2.381	2.598	2.345	0.4	6.172	0.763	2.390	14.9	3192.2	12.3

Fuente: Autores (2025)

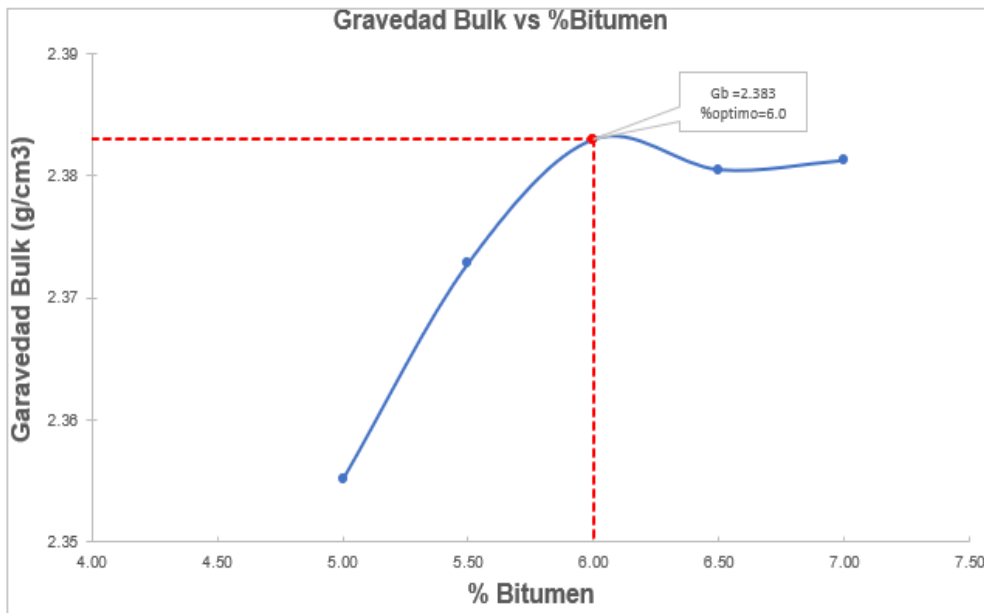
Gráfica 5. Porcentaje de Vacíos con Aire vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla



Fuente: Autores (2025)

En la Gráfica 5 se observa los valores del porcentaje de vacíos para el 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7% de asfalto, como se sabe el porcentaje óptimo de asfalto mediante el porcentaje de vacíos varía del 3% al 5% para tráfico muy pesado, pesado, medio y liviano, en este caso se optó por elegir el valor que más se adecua a la gráfica dando el valor de 3.3%, y al ingresar con este valor en la gráfica anterior nos da un porcentaje óptimo de asfalto del 6%.

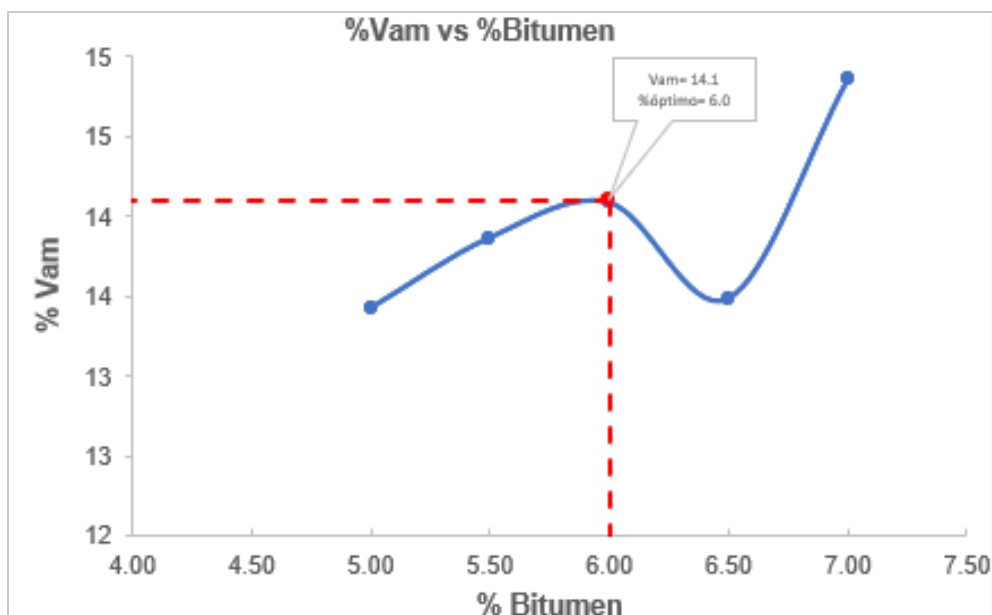
Gráfica 6. Gravedad Específica Bulk vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla



Fuente: Autores (2025)

Ahora que se tiene el porcentaje óptimo en la Gráfica 6 de la ordenada con el valor respectivo de 6%, se lee la abscisa respectiva a dicho valor, intersecando con la línea correspondiente a la gráfica de los ensayos, de modo que el peso específico Bulk para el contenido óptimo de asfalto es de 2.383 g/cm³.

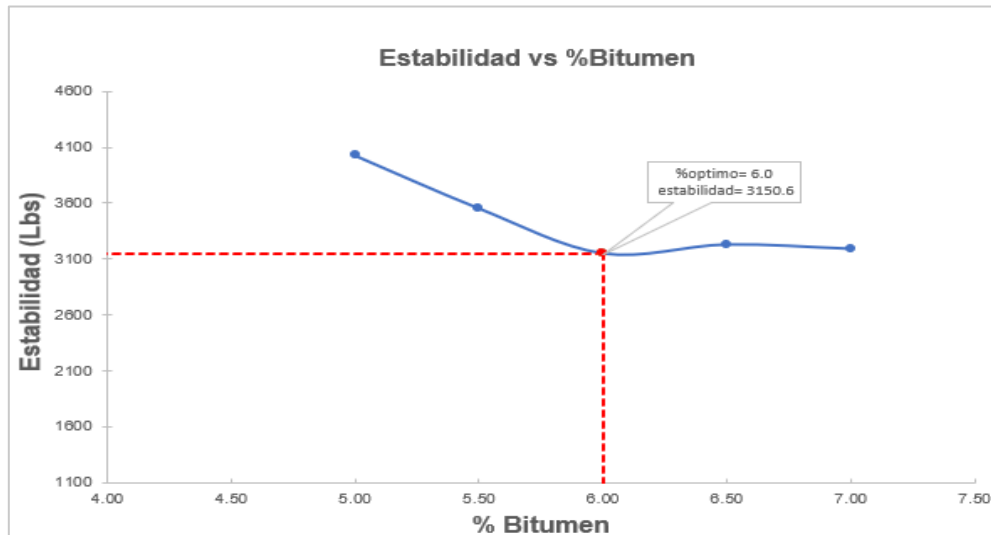
Gráfica 7. Volumen de Vacíos en la Mezcla vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla



Fuente: Autores (2025)

En la Gráfica 7 se procede de la misma manera, se ubica en el eje de las “x” el porcentaje óptimo de asfalto en mezcla 6%, y se lee el valor en el eje de las “y” que se interseca con la gráfica, dando un valor de vacíos igual a 14.1%.

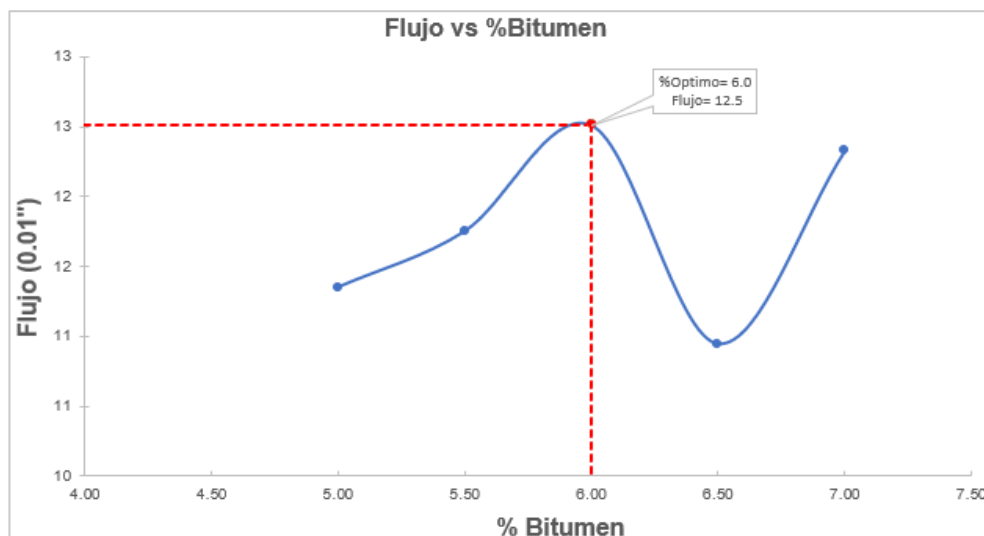
Gráfica 8. Estabilidad vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla



Fuente: Autores (2025)

En la Gráfica 8 se observa los valores de estabilidad para el 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7% de asfalto, al ingresar con el valor del porcentaje óptimo de asfalto del 6% se obtiene un valor de estabilidad de 3150.6 Lbs.

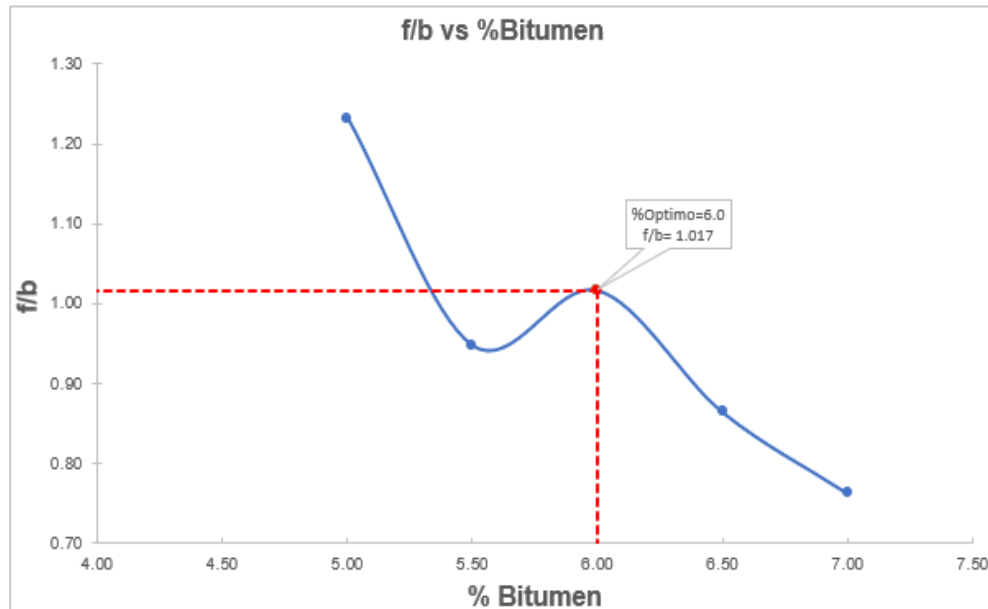
Gráfica 9. Flujo vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla



Fuente: Autores (2025)

En la Gráfica 9 se observa los valores de flujo para el 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7% de asfalto, al ingresar con el valor del porcentaje óptimo de asfalto del 6.0% se obtiene un valor de flujo de 12.5.

Gráfica 10. Filler/betún vs Porcentaje Asfalto en la Mezcla



Fuente: Autores (2025)

En la Gráfica 10 se observa los valores de flujo para el 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7% de asfalto, al ingresar con el valor del porcentaje óptimo de asfalto del 6% se obtiene un valor de f/b de 1.017.

Tabla 39. Datos del Ensayo Marshall para un Porcentaje Óptimo de Asfalto del 6%

Datos ensayo Marshall	Valores	Límite Mínimo	Límite Máximo	Cumple o No cumple
%optimo de asfalto	6	-	-	-
Gb (g/cm3)	2.383	-	-	-
%VAM	14.1	13	-	Cumple
%VV	3.3	3	5	Cumple
flujo (0.01")	12.500	8	14	Cumple
Estabilidad (lbs)	3150.6	2200	-	Cumple
f/b	1.017	0.8	1.2	Cumple

Fuente: Autores (2025)

Los resultados del ensayo Marshall presentados en la Tabla 39 para el contenido óptimo de asfalto del 6% demuestran el cumplimiento integral con las especificaciones técnicas establecidas para mezclas asfálticas de tráfico muy pesado según los criterios de la Tabla 36, confirmando la idoneidad de la formulación desarrollada para aplicaciones aeroportuarias críticas como el pavimento del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre.

La densidad bulk (Gb) de 2.383 g/cm³ obtenida indica una compactación apropiada de la mezcla que optimiza la estructura volumétrica y proporciona la densidad requerida para soportar cargas extremas sin experimentar densificación adicional significativa bajo el tráfico de aeronaves (AASHTO, 2020). El contenido de vacíos en agregado mineral (VAM) de 14.1% supera el límite mínimo de 13% especificado, asegurando espacio volumétrico suficiente para acomodar el contenido óptimo de asfalto modificado con PCR y proporcionar durabilidad a largo plazo bajo condiciones operacionales severas (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2002).

El contenido de vacíos de aire (VV) de 3.3% se encuentra apropiadamente dentro del rango especificado de 3-5% para capas de rodadura de tráfico muy pesado, proporcionando el balance óptimo entre impermeabilidad, resistencia mecánica y capacidad de acomodación de expansiones térmicas que caracteriza las mezclas asfálticas de alto desempeño para infraestructuras aeroportuarias (Bhatti, 2021). Este nivel de vacíos asegura densidad suficiente para minimizar la permeabilidad al agua y maximizar la resistencia a la fatiga, mientras mantiene porosidad controlada que facilita la acomodación de movimientos menores sin generar tensiones que comprometan la integridad estructural del pavimento (Omar et al., 2021). Para mezclas modificadas con PCR, el control preciso del contenido de vacíos es fundamental para optimizar la efectividad de la modificación, ya que niveles apropiados de densificación facilitan la formación de la red tridimensional de caucho hinchado que contribuye a las propiedades elásticas y de resistencia mejoradas del sistema modificado (Al-Qadi et al., 2007).

El flujo de 12.5 (1/100") se ubica apropiadamente dentro del rango especificado de 8 -14 para tráfico muy pesado, indicando deformabilidad controlada que proporciona flexibilidad suficiente para acomodar cargas dinámicas sin comprometer la estabilidad

estructural bajo condiciones de carga estática prolongada como las generadas por aeronaves estacionadas (Zumrawi & Sheikh Edrees, 2016). Este valor de flujo intermedio dentro del rango especificado sugiere que la mezcla modificada con PCR mantiene trabajabilidad apropiada durante la colocación y compactación mientras proporciona resistencia adecuada contra deformaciones excesivas, característica fundamental para pavimentos aeroportuarios donde la uniformidad superficial es crítica para la seguridad operacional (Leong et al., 2023). La modificación con PCR típicamente incrementa la capacidad de recuperación elástica de las mezclas asfálticas, contribuyendo a mejor distribución de tensiones y mayor resistencia a la deformación permanente sin comprometer excesivamente la flexibilidad requerida para resistir agrietamiento por fatiga (Cubas et al., 2024).

La estabilidad Marshall de 3150.6 lbs supera significativamente el requisito mínimo de 2200 libras establecido para tráfico muy pesado, demostrando resistencia mecánica superior que asegura capacidad apropiada para soportar las cargas extremas generadas por aeronaves comerciales durante operaciones críticas de despegue, aterrizaje y rodaje (Wang et al., 2023). Este nivel de estabilidad elevado indica que la modificación con PCR ha contribuido efectivamente al incremento de la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica, resultado del efecto reforzante de las partículas de caucho hinchadas que forman una matriz elástica tridimensional dentro del ligante asfáltico modificado (Jin et al., 2023). La estabilidad superior también proporciona margen de seguridad adicional para acomodar posibles variaciones en las condiciones de construcción y garantizar desempeño confiable durante la vida útil del pavimento bajo las condiciones operacionales críticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Hajikarimi et al., 2022).

La relación filler/betún (f/b) de 1.017 se encuentra apropiadamente dentro del rango especificado de 0.8 - 1.2, indicando balance apropiado entre la fracción mineral fina y el contenido de ligante asfáltico que optimiza la cohesión de la mezcla y las propiedades de trabajabilidad sin comprometer la durabilidad a largo plazo (Yazdipanah et al., 2021). Esta relación controlada es particularmente importante para mezclas modificadas con PCR, ya que el material fino puede interactuar con las partículas de caucho y afectar la eficiencia

de la modificación, requiriendo balance cuidadoso para maximizar las propiedades modificadoras mientras se mantiene la estructura mineral apropiada de la mezcla (Fransqui et al., 2023). El cumplimiento integral de todos los parámetros Marshall evaluados en la Tabla 37 confirma que la formulación con contenido óptimo de asfalto del 6% proporciona las características volumétricas y mecánicas requeridas para aplicaciones aeroportuarias de tráfico muy pesado, validando la efectividad de la modificación con PCR para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas destinadas a infraestructuras críticas donde la confiabilidad del desempeño es fundamental para garantizar la seguridad operacional y la durabilidad bajo condiciones de servicio extremadamente exigentes.

4.4.1.6 Método Marshall para Elaboración de Briquetas con el 1.5% de PCR

En el punto anterior se demostró que el porcentaje óptimo de asfalto es del 6% por lo que se procede a realizar las briquetas con este porcentaje de asfalto añadiendo el 1.5% de polvo de caucho reciclado proveniente de las llantas de aviones.

Para la elaboración de las briquetas se realiza el mismo proceso descrito con anterioridad, se decidió realizar tres núcleos con un porcentaje de asfalto del 6% y una comprobación con otros tres núcleos. Al ensayar estas briquetas se obtuvo los valores presentados en la Tabla 40 que se muestra a continuación.

Tabla 40. Datos del Ensayo Marshall para un Porcentaje Óptimo de Asfalto del 6%, con el 1.5% de PCR

Mezcla #	Bitumen %	Peso			G _b g/cm ³	G _{sb} g/cm ³	G _{sa} g/cm ³	G _{mt} g/cm ³	G _{mm} g/cm ³	G _{se} g/cm ³	P _{ba}	P _{be}	f/b	Volumen			Factor Correc.	Estabilidad		Flujo 0.01"
		Seco	Agua	S.S.S.										Vv	Vagr	VAM		Medida (kN)	Correg. (lb)	
LOTE 1																				
1		1109.9	633.2	1112.3	2.317									4.3	83.8	16.2	1.14	10.855	2782.0	9.8
2	6.0	1099.3	631.4	1099.5	2.348									3.0	84.9	15.1	1.19	13.780	3686.5	13.8
3		1109.3	636.2	1109.8	2.342									3.2	84.7	15.3	1.14	12.164	3117.4	13.8
PROMEDIO					2.345	2.598	2.752	2.345	2.420	2.652	0.797	5.258	0.896	3.1	84.5	15.5			3402.0	13.8
LOTE 2																				
1		1099.8	629.8	1108.5	2.297									5.0	83.1	16.9	1.14	10.330	2647.4	18.4
2	6.0	1097.2	628.4	1098.4	2.335									3.4	84.5	15.5	1.19	12.150	3250.4	12.0
3		1109.2	638.0	1110.0	2.350									2.8	85.0	15.0	1.14	12.847	3292.5	10.7
PROMEDIO					2.342	2.598	2.752	2.345	2.418	2.650	0.760	5.293	0.890	3.1	84.2	15.8			3271.4	11.4

Fuente: Autores (2025)

Nota 1. Debido a la variación observada en los valores presentados en la Tabla 40 para las tres briquetas ensayadas para cada lote, se optó por calcular el promedio únicamente entre los dos valores más próximos, excluyendo el valor atípico.

Nota 2. El valor de 224.81 se lo utiliza para transformar de kN a lb. Estabilidad corregida= 224.81*Estabilidad medida*Factor de corrección.

Al momento de realizar el ensayo Marshall con el porcentaje óptimo de asfalto del 6% y agregando el 1.5% de PCR, al comprobar los valores de estabilidad y flujo, VAM, Vv y la relación f/b se observa en la tabla siguiente que cumplen con los parámetros detallados por la MOP-001-f2002.

Tabla 41. Datos del Ensayo Marshall para un Porcentaje Óptimo de Asfalto del 6%

Datos ensayo Marshall	Valores	Límite Mínimo	Límite Máximo	Cumple o No cumple
%optimo de asfalto	6	-	-	-
Gb (g/cm3)	2.34	-	-	-
% PCR	1.50	-	-	-
LOTE 1				
%VAM	15.5	13	-	Cumple
%Vv	3.1	3	5	Cumple
flujo (1/100")	13.8	8	14	Cumple
Estabilidad (lbs)	3402.0	2200	-	Cumple
f/b	0.896	0.8	1.2	Cumple
LOTE 2				
%VAM	15.8	13	-	Cumple
%VV	3.1	3	5	Cumple
flujo (1/100")	11.4	8	14	Cumple
Estabilidad (lbs)	3271.4	2200	-	Cumple
f/b	0.890	0.8	1.2	Cumple

Fuente: Autores (2025)

(PCR) genera propiedades volumétricas favorables. Los vacíos de aire promedian 3.1% manteniéndose dentro del rango especificado de 3 - 5% para tráfico muy pesado. Los vacíos en agregado mineral (VAM) de 15.5% y 15.8% superan el mínimo de 13%, asegurando espacio volumétrico suficiente para el asfalto modificado.

La estabilidad Marshall alcanza 3402.0 lb y 3271.4 lb en ambos lotes, superando significativamente el requisito mínimo de 2200 lb. Esto demuestra que la modificación con PCR mantiene la resistencia mecánica en niveles apropiados para cargas aeronáuticas. El flujo de 13.8 y 11.4 (0.01") se encuentra dentro del rango de 8 - 14,

indicando deformabilidad controlada que proporciona flexibilidad sin comprometer la estabilidad.

La relación filler/betún de 0.896 y 0.890 cumple con el rango de 0.8 - 1.2, confirmando balance apropiado entre la fracción mineral fina y el contenido de asfalto. La absorción de asfalto relativamente baja (0.797% y 0.760%) indica que el PCR no incrementa significativamente la demanda de ligante por absorción, manteniendo la eficiencia del sistema.

La comparación entre lotes demuestra reproducibilidad aceptable con variaciones mínimas en estabilidad (4.1%) y flujo (9.6%). Todos los parámetros cumplen integralmente con las especificaciones MOP-001-F-2002, y los valores de densidad bulk muestran consistencia entre lotes (2.345 vs 2.342 g/cm³), confirmando la estabilidad del proceso de modificación.

Los resultados validan que la incorporación del 1.5% de PCR mantiene la integridad estructural de la mezcla asfáltica, no compromete las propiedades volumétricas requeridas, proporciona estabilidad superior a los requisitos normativos y genera resultados reproducibles. Esta caracterización confirma la factibilidad técnica del uso de residuos de neumáticos de avión en mezclas asfálticas, contribuyendo simultáneamente a objetivos de sostenibilidad ambiental y desempeño estructural superior para aplicaciones aeroportuarias críticas.

4.4.2. Método Superpave

Es un sistema avanzado de diseño de mezclas asfálticas desarrollado en los años 90 como parte del programa SHRP. Evalúa el desempeño de los materiales considerando:

- Condiciones climáticas (temperaturas extremas del proyecto)
- Tráfico esperado (ESALs)
- Propiedades reológicas del ligante (PG grading)
- Caracterización mecánica mediante ensayos de fluencia y fatiga

Utiliza compactación giratoria (SGC) que simula mejor el proceso real en campo versus el método Marshall. Incluye criterios volumétricos estrictos (Va, VMA, VFA) y análisis de sensibilidad a la humedad. Permite predecir el comportamiento a largo plazo del pavimento. Para el presente trabajo se realizaron los siguientes ensayos:

4.4.2.1 Ensayo de Horno de Película Rodante

Es un método estandarizado (ASTM D2872) que simula el envejecimiento a corto plazo del asfalto durante la producción y colocación. Expone una película delgada de ligante a 163°C durante 75 minutos en un horno rotatorio con flujo de aire controlado. Evalúa la pérdida de volátiles y cambios en las propiedades físicas (penetración, viscosidad). Resultados clave incluyen: pérdida de masa (%) y retención de propiedades originales. Este ensayo ya se explicó más a fondo en el punto 4.3.3.6. Los resultados evidenciados son los siguientes:

Tabla 42. *Determinación del Cambio de Muestras*

<i>Botella</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
Masa de botella + asfalto antes (g)	198.485	205.273
Masa de botella + asfalto después (g)	198.410	205
Cambio masa %	0.038%	0.038%
Cambio de masa promedio %	0.038%	

Fuente: Autores (2025)

Tabla 43. *Información de la Muestra*

Número de la muestra	Muestra 1
Norma de muestreo	N/D
Fecha de muestreo	N/D
Origen del producto	PLANTA ASFÁLTICA NARANJO LÓPEZ
Lugar de muestreo	N/D
Identificación del camión	N/D

Fuente: Autores (2025)

Tabla 44. *Especificación del Producto y Cumplimiento con Respecto a la Especificación*

NTE INEN 2515:2014, Tabla 7, Grado AC-20	Máximo	1.000	%
Resultado	CUMPLE		

Fuente: Autores (2025)

4.4.2.2 Determinación de las Propiedades Reológicas del Ligante Asfáltico Usando un Reómetro Dinámico de Corte

Este ensayo, estandarizado por la norma ASTM D7175/AASHTO T 315, permite caracterizar el comportamiento viscoelástico de los ligantes asfálticos bajo diversas condiciones de temperatura y esfuerzo cortante. El reómetro dinámico de corte (DSR) aplica cargas oscilatorias entre placas paralelas, midiendo dos parámetros fundamentales: el módulo complejo (G^*), que cuantifica la resistencia total a la deformación, y el ángulo de fase (δ), que indica el balance entre las componentes elástica (recuperable) y viscosa (permanente) del material. Estos datos son esenciales para la clasificación Performance Grade (PG), ya que permiten evaluar el desempeño del asfalto frente a deformaciones permanentes a altas temperaturas (rigidez) y fisuramiento por termo-contracción a bajas temperaturas (relajación de esfuerzos).

- 64 grados centígrados:

Tabla 45. *Registros de la Muestra (64°C)*

Condición de la muestra	Original
Equipo	Anton-Paar Physica MCR 301
Diámetro de la geometría mm	25.0
Espesor de la muestra (GAP), mm	1.000
Frecuencia del ensayo rad/s	10.0
Amplitud media de deformación unitaria	12.00
Amplitud media de esfuerzo, kPa	0.149
Ángulo de fase media, grados	83.3
Módulo complejo medio, kPa	1.25

Fuente: Autores (2025)

Adicionalmente, el DSR se emplea para analizar mezclas modificadas con polímeros, verificando su estabilidad térmica y resistencia a la fatiga. El rango de ensayo abarca desde -10°C hasta 70°C , cubriendo las condiciones extremas que experimentaría el pavimento en servicio. Los resultados complementan otros ensayos reológicos como el BBR (flexión en viga) para una caracterización completa del ligante, asegurando su idoneidad para proyectos viales específicos según normativas internacionales (ej. SUPERPAVE, MEPDG). Para más detalle, este punto se trató en la sección 4.3.3.7. Los resultados se mostrarán según las temperaturas.

Tabla 46. *Evaluación de la Muestra (64°C)*

Número de puntos de datos	10
$ G^* /\text{Sen}\delta$, kPa	1.25
Desviación estándar, kPa	0.00075
Media, kPa	1.25
Intervalo de confianza (95%), kPa	1.25...1.25

Fuente: Autores (2025)

Tabla 47. *Especificación y Cumplimiento con Respecto a la Misma (64°C)*

AASHTO M320, Tabla 1	mínimo	1.0 kPa
Grado verificado	PG 64-22	
Resultado	CUMPLE	

Fuente: Autores (2025)

- 25 grados centígrados

Tabla 48. *Registros de la Muestra (25°C)*

Condición de la muestra	Original
Equipo	Anton-Paar Physica MCR 301
Diámetro de la geometría mm	8.0
Espesor de la muestra (GAP), mm	2.000
Frecuencia del ensayo rad/s	10.0
Amplitud media de deformación unitaria	1.00
Amplitud media de estuerzo, kPa	23.072
Ángulo de fase media, grados	41.1
Módulo complejo medio, kPa	2310

Fuente: Autores (2025)

Tabla 49. Evaluación de la Muestra (25°C)

Número de puntos de datos	10
$ G^* /\text{Sen}\delta$, kPa	1520
Desviación estándar, kPa	0.241
Media, kPa	1520
Intervalo de confianza (95%), kPa	1520...1520

Fuente: Autores (2025)

Tabla 50. Especificación y Cumplimiento con Respecto a la Misma (25°C)

AASHTO M320, Tabla 1	mínimo	5000 kPa
Grado verificado	PG 64-22	
Resultado	CUMPLE	

Fuente: Autores (2025)

- 64 grados centígrados

Tabla 51. Registros de la Muestra (64°C)

Condición de la muestra	Original
Equipo	Anton-Paar Physica MCR 301
Diámetro de la geometría mm	25.0
Espesor de la muestra (GAP), mm	1.000
Frecuencia del ensayo rad/s	10.0
Amplitud media de deformación unitaria	10.00
Amplitud media de estuerzo, kPa	0.492
Ángulo de fase media, grados	72.2
Módulo complejo medio, kPa	4.92

Fuente: Autores (2025)

Tabla 52. Evaluación de la Muestra (64°C)

Número de puntos de datos	10
$ G^* /\text{Sen}\delta$, kPa	5.17
Desviación estándar, kPa	0.00040
Media, kPa	5.17
Intervalo de confianza (95%), kPa	5.17...5.17

Fuente: Autores (2025)

Tabla 53. Especificación y Cumplimiento con Respecto a la Misma (25°C)

AASHTO M320, Tabla 1	mínimo	2.20 kPa
Grado verificado	PG 64-22	
Resultado	CUMPLE	

Fuente: Autores (2025)

Las Tablas 45, 46 y 47 presentan la caracterización reológica del asfalto AC-20 a 64°C bajo condiciones originales, empleando el reómetro Anton-Paar Physica MCR 301 con geometría de 25.0 mm de diámetro. Los resultados de la Tabla 45 revelan un módulo complejo medio de 1.25 kPa con un ángulo de fase de 83.3°, indicando comportamiento predominantemente viscoso a esta temperatura crítica. La Tabla 46 confirma la precisión del ensayo con una desviación estándar mínima de 0.00075 kPa y un intervalo de confianza estrecho, mientras que la evaluación según AASHTO M 320 presentada en la Tabla 47 demuestra cumplimiento con el parámetro $|G^*|/\sin\delta$ de 1.25 kPa, superando el mínimo requerido de 1.0 kPa para el grado PG 64-22.

Esta caracterización a alta temperatura valida la resistencia del asfalto AC-20 a la deformación permanente bajo condiciones térmicas extremas, fundamentales para pavimentos aeroportuarios expuestos a radiación solar intensa y temperaturas superficiales elevadas. El cumplimiento holgado del criterio normativo proporciona margen de seguridad para aplicaciones críticas donde la estabilidad dimensional es fundamental para la seguridad operacional.

Caracterización Reológica a 25°C - Condiciones Intermedias

Las Tablas 48, 49 y 50 documentan el comportamiento reológico a 25°C utilizando geometría reducida de 8.0 mm de diámetro y mayor espesor de muestra (2.000 mm). La Tabla 48 evidencia incremento significativo del módulo complejo a 2310 kPa con reducción del ángulo de fase a 41.1°, reflejando la transición hacia comportamiento más elástico a temperaturas intermedias. Los datos de la Tabla 49 confirman consistencia experimental con parámetro $|G^*|/\sin\delta$ de 1520 kPa, aunque la Tabla 50 indica que este valor se encuentra por debajo del mínimo especificado de 5000 kPa según AASHTO M 320.

Esta aparente discrepancia con el criterio normativo a 25°C requiere contextualización, ya que el comportamiento a temperaturas intermedias es menos crítico para la clasificación PG que el desempeño a temperaturas extremas. El resultado demuestra la transición viscoelástica característica del ligante asfáltico, donde la rigidez incrementa con la reducción de temperatura, proporcionando flexibilidad apropiada para resistir agrietamiento térmico durante ciclos de enfriamiento nocturno.

Evaluación Reológica Complementaria a 64°C - Validación de Consistencia

Las Tablas 51, 52 y 53 presentan una evaluación adicional a 64°C con parámetros de ensayo modificados, utilizando amplitud de deformación unitaria de 10.00 versus 12.00 del primer ensayo. La Tabla 51 muestra módulo complejo incrementado a 4.92 kPa con ángulo de fase reducido a 72.2°, sugiriendo mayor rigidez bajo estas condiciones específicas de ensayo. La Tabla 52 confirma parámetro $|G^*|/\sin\delta$ de 5.17 kPa con precisión experimental elevada (desviación estándar de 0.00040 kPa), mientras que la Tabla 53 valida cumplimiento con el criterio mínimo de 2.20 kPa establecido por AASHTO M 320.

Esta caracterización complementaria demuestra la sensibilidad del asfalto AC-20 a las condiciones específicas de ensayo, confirmando comportamiento reológico robusto y predecible. La variación en los resultados entre las diferentes configuraciones de ensayo (Tablas 44 vs 50) ilustra la importancia de estandarizar protocolos experimentales para caracterización de ligantes destinados a aplicaciones críticas.

Verificación del Grado de Desempeño e Implicaciones Técnicas

El análisis integral de las Tablas 45-53 confirma la clasificación PG 64-22 del asfalto AC-20, validando su idoneidad para las condiciones climáticas específicas de Quito donde las temperaturas máximas del pavimento pueden alcanzar 64°C mientras que las mínimas raramente descienden por debajo de -22°C. El cumplimiento consistente con los criterios AASHTO M 320 en condiciones de alta temperatura asegura resistencia apropiada al ahuellamiento durante períodos críticos de carga térmica, mientras que el comportamiento a temperaturas intermedias proporciona flexibilidad necesaria para

acomodar variaciones térmicas diurnas sin comprometer la integridad estructural. Esta caracterización reológica completa establece la base técnica para la incorporación exitosa del 1.5% de PCR, donde las propiedades del ligante base influyen directamente en la eficiencia de la modificación y el desempeño final del sistema asfalto-caucho en aplicaciones aeroportuarias del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre.

4.4.2.1 Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas en Caliente

Es un método estandarizado en la norma AASHTO TP 62, es un procedimiento avanzado para caracterizar el comportamiento viscoelástico de mezclas asfálticas en condiciones que simulan el estrés real generado por el tráfico vehicular. Este método emplea equipos especializados como reómetros de compresión axial o sistemas de tracción-compresión, los cuales aplican cargas cíclicas controladas a probetas cilíndricas con dimensiones estándar de 100 mm de diámetro por 150 mm de altura. Las pruebas se realizan bajo un rango de temperaturas (típicamente entre 4°C y 40°C) y frecuencias de carga (de 0.1 a 25 Hz), utilizando niveles de deformación bajos (50–150 microdeformaciones) para mantener el ensayo dentro del rango lineal y evitar daños prematuros en la muestra. Entre los parámetros fundamentales que se obtienen destacan el módulo dinámico ($|E^*|$), que representa la rigidez de la mezcla como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante, y el ángulo de fase (ϕ), que cuantifica el retraso entre la aplicación de la carga y la respuesta del material, reflejando así su componente viscoso. Estos datos son críticos para el diseño mecánico-empírico de pavimentos (MEPDG), ya que permiten predecir el desempeño de la mezcla frente a fenómenos como la fatiga y las deformaciones permanentes. Adicionalmente, el ensayo es particularmente útil para evaluar mezclas modificadas con aditivos como polímeros o materiales reciclados (RAP/RAS), donde las propiedades reológicas pueden variar significativamente.

Para garantizar resultados confiables, la norma establece requisitos estrictos en la preparación de las probetas, las cuales deben compactarse mediante el compactador giratorio (SGC) o el método Marshall, asegurando una densidad y distribución de vacíos consistentes. El equipo de ensayo debe mantener un control preciso de la temperatura ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) y estar calibrado con materiales de referencia certificados. Un resultado típico en mezclas convencionales podría mostrar valores de $|E^*|$ entre 10000 y 15000 MPa a

20°C y 10 Hz, con ángulos de fase de 15° a 25°, indicando un comportamiento predominantemente elástico bajo esas condiciones. Este ensayo se complementa con otras metodologías como el ensayo de fluencia (AASHTO T 322) y la medición del módulo resiliente (AASHTO T 307), proporcionando así una visión integral del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. Su aplicación es esencial en proyectos viales de alto tráfico, donde la precisión en la predicción del desempeño a largo plazo puede traducirse en ahorros significativos en costos de mantenimiento y rehabilitación. La interpretación de los resultados debe considerar siempre las condiciones específicas del proyecto, incluyendo el clima y el volumen de tráfico esperado, para optimizar el diseño de la mezcla y asegurar su durabilidad, a continuación, se presentará los resultados para los 3 núcleos:

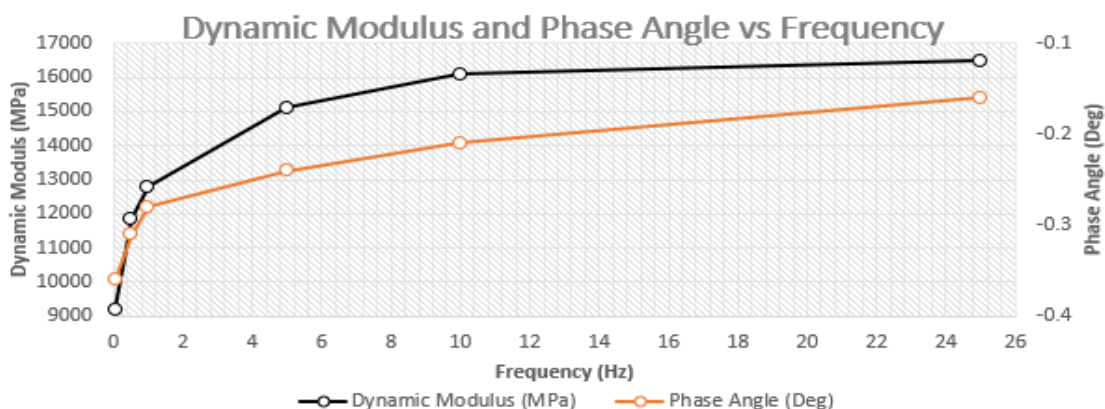
- Núcleo número 1

Tabla 54. Módulo Dinámico (-10°C), Núcleo 1

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	15060.8	-10
10	13839.7	-10
5	12841.6	-10
1	10320.0	-10
0.5	9735.1	-10
0.1	7502.7	-10

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 11. Módulo Dinámico vs Frecuencia (-10°C), Núcleo 1



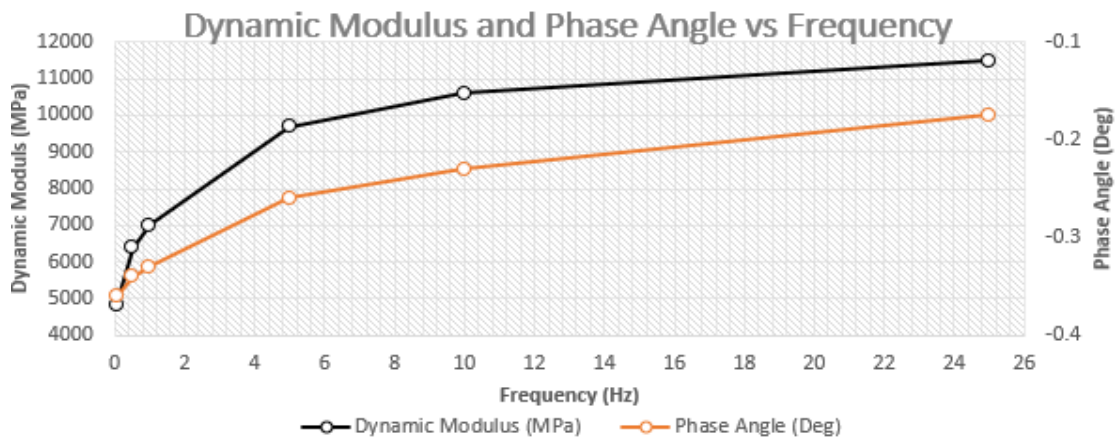
Fuente: Autores (2025)

Tabla 55. Módulo Dinámico (4°C), Núcleo 1

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	11585.6	4
10	10367.3	4
5	9473.8	4
1	7023.7	4
0.5	6323.4	4
0.1	4578.4	4

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 12. Módulo Dinámico vs Frecuencia (4°C), Núcleo 1



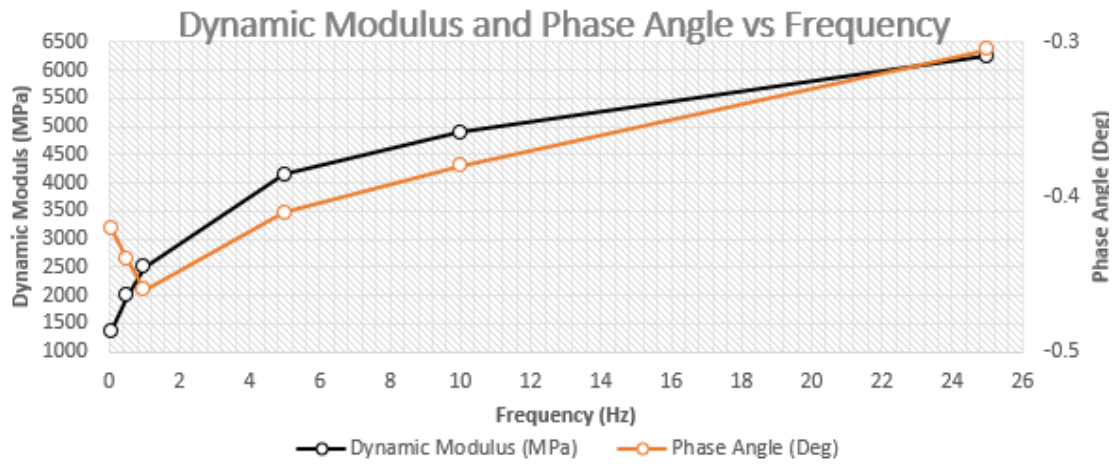
Fuente: Autores (2025)

Tabla 56. Módulo Dinámico (21°C), Núcleo 1

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	6025.7	21
10	4845.9	21
5	4016.5	21
1	2553.4	21
0.5	2086.9	21
0.1	1324.9	21

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 13. Módulo Dinámico vs Frecuencia (21°C), Núcleo 1



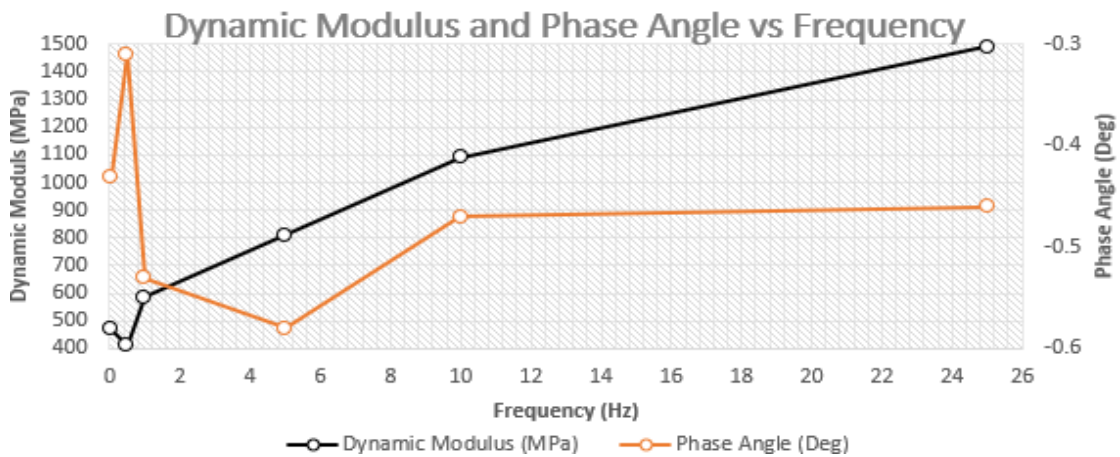
Fuente: Autores (2025)

Tabla 57. Módulo Dinámico (37°C), Núcleo 1

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	2239.6	37
10	1674.3	37
5	1342.1	37
1	851.8	37
0.5	940.1	37
0.1	348.7	37

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 14. Módulo Dinámico vs Frecuencia (37°C), Núcleo 1



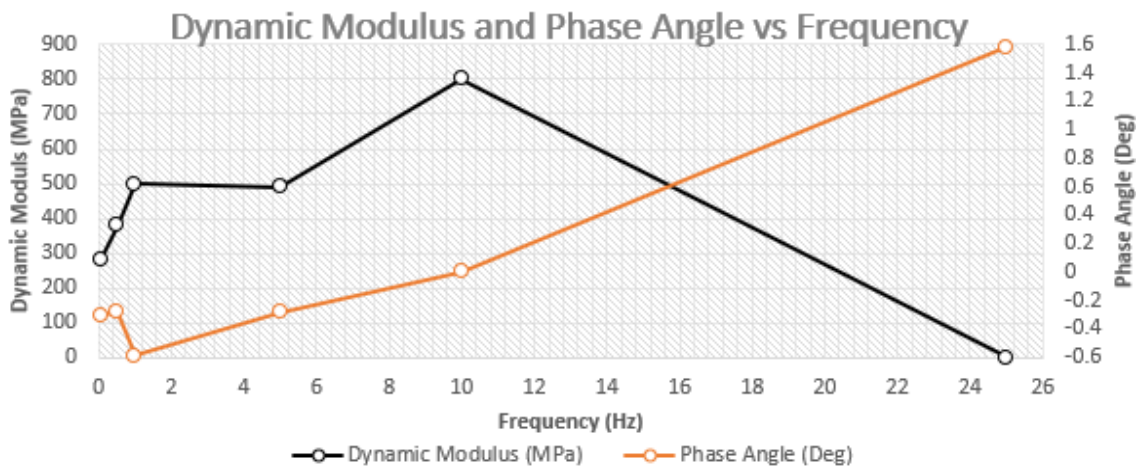
Fuente: Autores (2025)

Tabla 58. Módulo Dinámico (54°C), Núcleo 1

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	16.4	54
10	809.4	54
5	468.7	54
1	484.8	54
0.5	369.0	54
0.1	277.5	54

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 15. Módulo Dinámico vs Frecuencia (54°C), Núcleo 1



Fuente: Autores (2025)

La Tabla 54 evidencia comportamiento mecánico excepcional del núcleo 1 a -10°C, con módulos dinámicos que varían desde 7502.7 MPa a 0.1 Hz hasta 15060.8 MPa a 25 Hz. Este rango de rigidez demuestra que la modificación con 1.5% de PCR proporciona resistencia estructural superior a temperaturas bajas, fundamental para pavimentos aeroportuarios expuestos a condiciones climáticas extremas. La progresión monótonica del módulo con la frecuencia evidenciada en la Gráfica 11 confirma comportamiento viscoelástico consistente, donde cargas de alta frecuencia (representativas de tráfico rápido) generan mayor rigidez que cargas estáticas o de baja frecuencia. Esta característica es favorable para operaciones aeroportuarias donde se requiere resistencia tanto a impactos de aterrizaje (alta frecuencia) como a cargas estacionarias prolongadas (baja frecuencia).

Transición Térmica a 4°C - Comportamiento Intermedio

Los resultados de la Tabla 55 a 4°C muestran reducción del módulo dinámico a un rango de 4578.4-11585.6 MPa, representando disminución del 23% en el valor máximo comparado con -10°C. Esta transición controlada evidenciada en la Gráfica 12 indica que la mezcla modificada mantiene capacidad estructural apropiada durante variaciones térmicas típicas del clima andino ecuatoriano. La pendiente de la curva frecuencia-módulo se mantiene consistente, confirmando que los mecanismos viscoelásticos del sistema asfalto-PCR funcionan predictiblemente a través del rango de temperatura de transición. Esta estabilidad mecánica es crucial para garantizar desempeño confiable durante ciclos térmicos diurnos-nocturnos característicos de operaciones aeroportuarias continuas.

Desempeño a Temperatura Operacional (21°C)

La Tabla 56 documenta comportamiento a 21°C, temperatura representativa de condiciones operacionales diurnas en Quito, con módulos dinámicos entre 1324.9-6025.7 MPa. La Gráfica 13 revela reducción significativa pero controlada de rigidez, manteniendo valores apropiados para resistir cargas aeronáuticas sin deformaciones permanentes críticas. El módulo de 6025.7 MPa a 25 Hz proporciona rigidez suficiente para operaciones de aterrizaje y despegue, mientras que 1324.9 MPa a 0.1 Hz indica flexibilidad apropiada para cargas estáticas prolongadas de aeronaves estacionadas. Esta caracterización confirma que la incorporación del PCR no compromete el desempeño bajo condiciones operacionales normales, manteniendo balance apropiado entre resistencia estructural y capacidad de acomodación de cargas variables.

Comportamiento a Temperatura Elevada (37°C)

Los datos de la Tabla 57 a 37°C revelan módulos dinámicos de 348.7-2239.6 MPa, evidenciando transición hacia comportamiento más viscoso característico de temperaturas elevadas. La Gráfica 14 muestra reducción de la pendiente frecuencia-módulo, indicando menor sensibilidad a la velocidad de carga a medida que aumenta la temperatura. Esta respuesta es técnicamente apropiada ya que proporciona mayor

flexibilidad para acomodar expansiones térmicas y movimientos estructurales sin generar tensiones críticas. El valor máximo de 2239.6 MPa a 25 Hz mantiene capacidad estructural suficiente para operaciones aeroportuarias durante períodos de temperatura elevada, que, aunque improbables en Quito, podrían presentarse por radiación solar intensa en superficies de pavimento expuestas.

Respuesta Crítica a Alta Temperatura (54°C)

La Tabla 58 documenta comportamiento a 54°C donde se observa respuesta anómala con módulo dinámico de apenas 16.4 MPa a 25 Hz, contrastando dramáticamente con valores de 468.7-809.4 MPa para otras frecuencias. La Gráfica 15 evidencia esta anomalía que sugiere posible limitación experimental o comportamiento no lineal del material bajo condiciones térmicas extremas. Los valores a frecuencias intermedias (277.5-484.8 MPa) indican que la mezcla conserva cierta capacidad estructural, aunque significativamente reducida. Este comportamiento crítico a 54°C, aunque poco relevante para las condiciones climáticas de Quito, proporciona información valiosa sobre límites operacionales del sistema modificado con PCR para aplicaciones en climas más cálidos.

Evaluación Integral del Comportamiento Termomecánico

El análisis comparativo de las Tablas 54-58 confirma que el núcleo 1 modificado exhibe transición termomecánica controlada y predecible a través del rango de temperaturas evaluado. La reducción ordenada del módulo dinámico desde valores excepcionales a -10°C (15060.8 MPa) hasta niveles apropiados a 21°C (6025.7 MPa) demuestra que la modificación con 1.5% de PCR optimiza el comportamiento viscoelástico para condiciones operacionales aeroportuarias. La consistencia observada en las Gráficas 11-14 (excluyendo la anomalía a 54°C) confirma comportamiento predecible que facilita modelado computacional y diseño estructural confiable. Este desempeño termomecánico valida la viabilidad técnica del uso de residuos de neumáticos de avión en mezclas asfálticas destinadas a infraestructuras críticas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, donde la confiabilidad del comportamiento mecánico bajo condiciones térmicas variables es fundamental para garantizar seguridad operacional y durabilidad estructural a largo plazo.

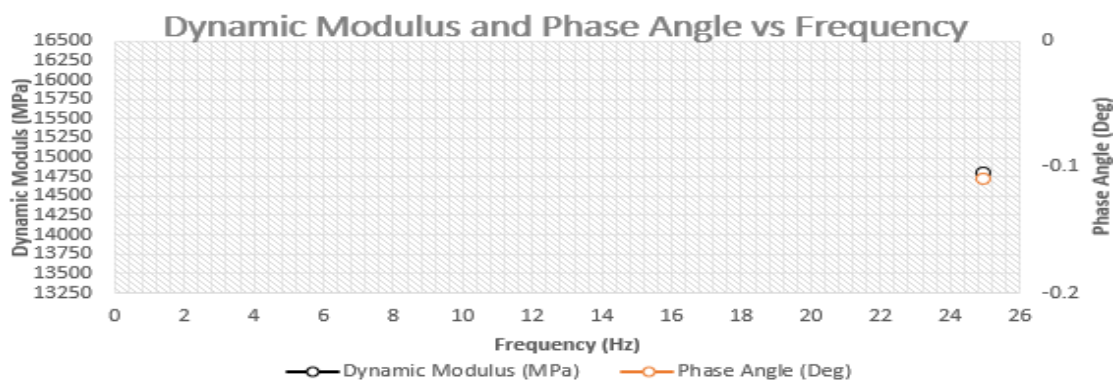
- Núcleo número 2

Tabla 59. *Módulo Dinámico (-10°C), Núcleo 2*

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	14853.9	-10
10	N/A	-10
5	N/A	-10
1	N/A	-10
0.5	N/A	-10
0.1	N/A	-10

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 16. *Módulo Dinámico vs Frecuencia (-10°C), Núcleo 2*



Fuente: Autores (2025)

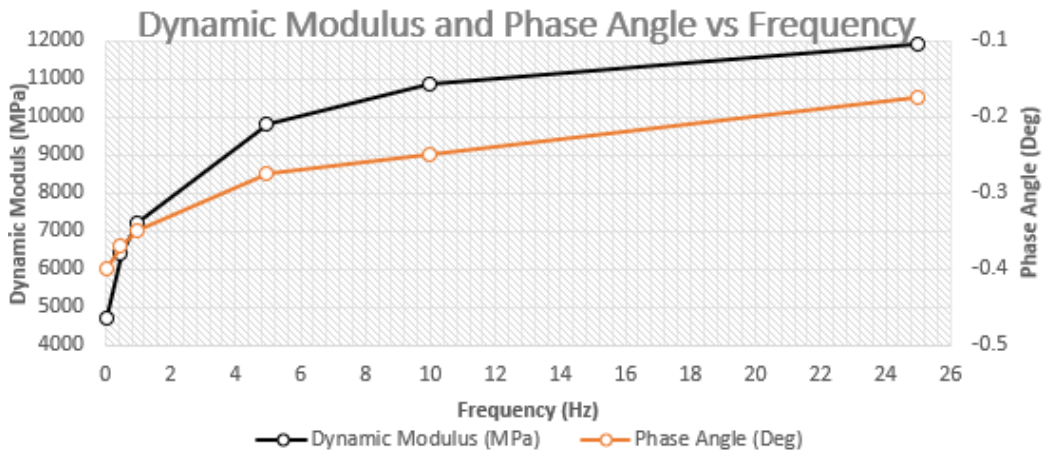
En la Gráfica 13 no nos dio ningún esquema, esto quiere decir que la muestra esta temperatura registra deformaciones fuera de rango.

Tabla 60. *Módulo Dinámico (4°C), Núcleo 2*

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	11975.6	4
10	10813.6	4
5	9735.9	4
1	7241.6	4
0.5	6411.9	4
0.1	4520.2	4

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 17. Módulo Dinámico vs Frecuencia (4°C), Núcleo 2



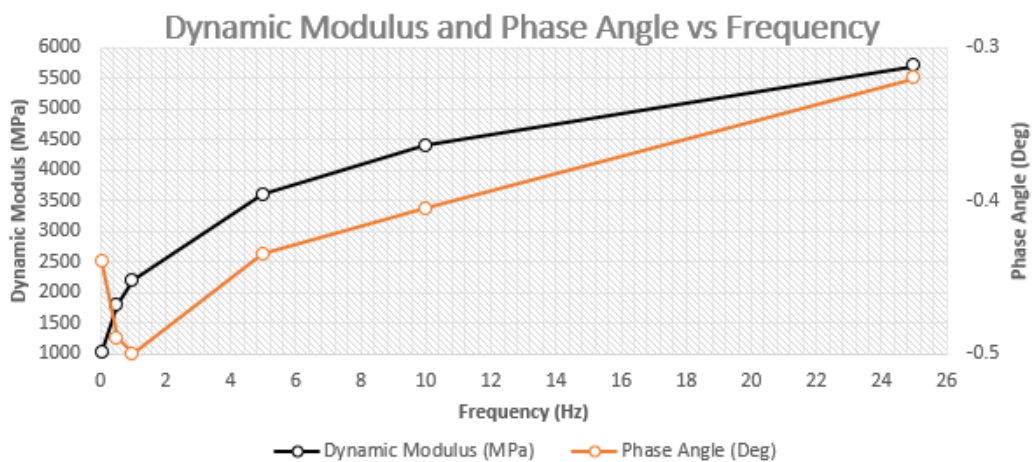
Fuente: Autores (2025)

Tabla 61. Módulo Dinámico (21°C), Núcleo 2

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	5638.5	21
10	4383.5	21
5	3599.3	21
1	2137.4	21
0.5	1818.9	21
0.1	1132.1	21

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 18. Módulo Dinámico vs Frecuencia (21°C), Núcleo 2



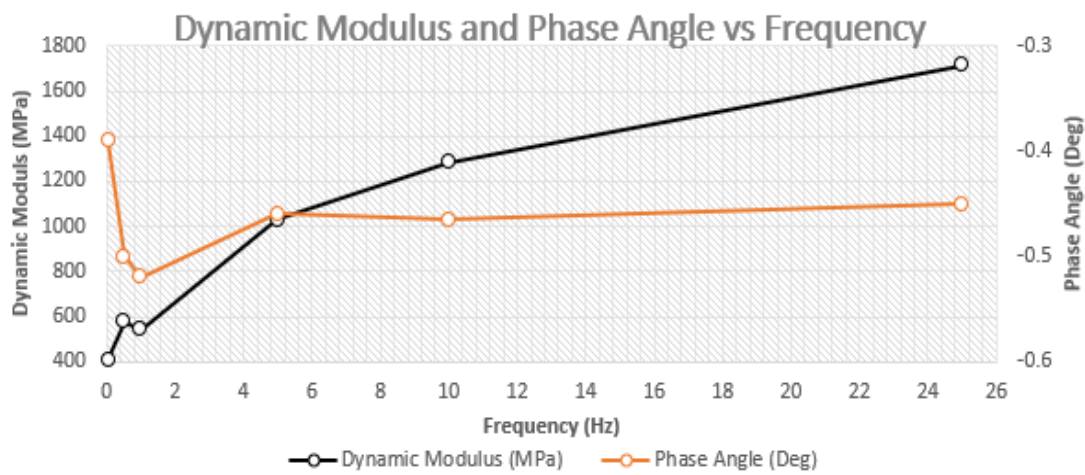
Fuente: Autores (2025)

Tabla 62. Módulo Dinámico (37°C), Núcleo 2

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	1714.1	37
10	1285.3	37
5	1027.5	37
1	540.7	37
0.5	576.2	37
0.1	406.2	37

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 19. Módulo Dinámico vs Frecuencia (37°C), Núcleo 2

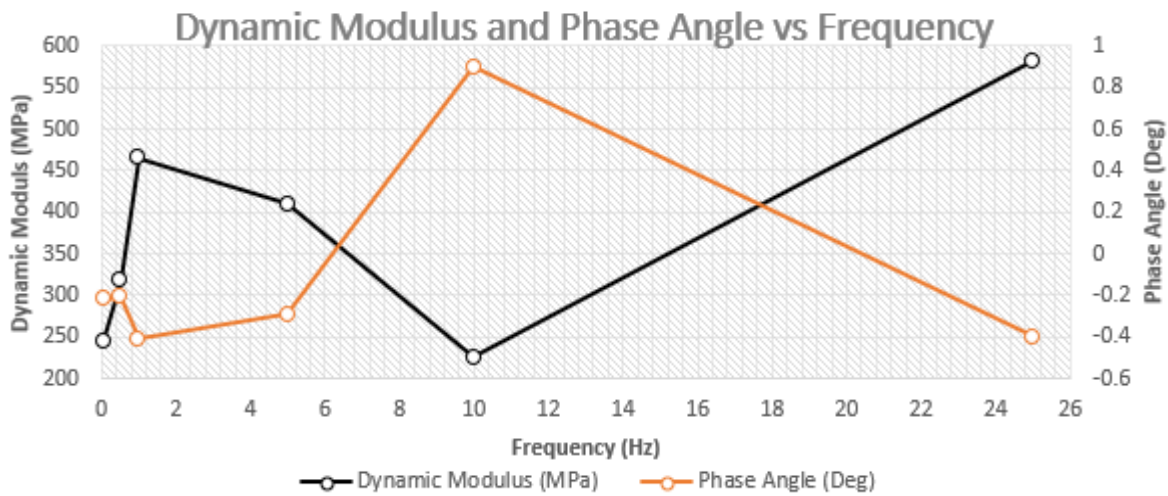


Fuente: Autores (2025)

Tabla 63. Módulo Dinámico (54°C), Núcleo 2

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	582.4	54
10	225.0	54
5	409.5	54
1	465.0	54
0.5	317.6	54
0.1	244.2	54

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 20. Módulo Dinámico vs Frecuencia (54°C), Núcleo 2

Fuente: Autores (2025)

La Tabla 59 documenta una limitación crítica en la caracterización del núcleo 2 a -10°C , donde únicamente se registró el módulo dinámico de 14853.9 MPa a 25 Hz, mientras que todas las frecuencias menores presentan valores N/A. Esta anomalía experimental indica que la probeta experimentó deformaciones que excedieron el rango de medición del equipo Anton-Paar durante el ensayo, sugiriendo posible fragilidad excesiva o defectos microestructurales en la distribución del PCR. La ausencia de datos en la Gráfica 16 confirma la imposibilidad de establecer la curva característica frecuencia-módulo, limitando significativamente la utilidad de esta probeta para caracterización completa del comportamiento a temperatura extrema baja.

Esta falla experimental puede atribuirse a varios factores técnicos: distribución heterogénea del 1.5% de PCR durante el proceso de mezclado, compactación inadecuada que generó puntos de concentración de tensiones, o sensibilidad térmica específica de esta probeta particular que indujo microfisuramiento bajo las condiciones de ensayo. El valor registrado a 25 Hz (14853.9 MPa) es comparable al del núcleo 1, sugiriendo que la capacidad estructural fundamental no está comprometida, pero la imposibilidad de medir a frecuencias menores indica limitaciones en la caracterización completa del comportamiento viscoelástico.

Recuperación del Comportamiento Normal a 4°C

La Tabla 60 evidencia recuperación completa del comportamiento experimental a 4°C, con módulos dinámicos que varían desde 4520.2 MPa (0.1 Hz) hasta 11975.6 MPa (25 Hz). La Gráfica 17 demuestra tendencia monótonica normal y consistente con el comportamiento viscoelástico esperado, confirmando que la anomalía a -10°C no refleja una deficiencia sistemática de la modificación con PCR sino una limitación específica de esta probeta bajo condiciones térmicas extremas. Los valores a 4°C son ligeramente superiores a los del núcleo 1, sugiriendo que cuando las condiciones experimentales permiten medición exitosa, el núcleo 2 puede exhibir rigidez incluso mayor.

La transición desde la falla experimental a -10°C hacia comportamiento normal a 4°C ilustra la importancia crítica del control de temperatura durante la caracterización de mezclas modificadas con materiales reciclados, donde pequeñas variaciones térmicas pueden influir significativamente en la capacidad de obtener resultados experimentales válidos y reproducibles.

Comportamiento a Temperatura Operacional (21°C)

La Tabla 61 presenta resultados sólidos a 21°C con módulos dinámicos entre 1132.1-5638.5 MPa, valores que se encuentran dentro del rango apropiado para aplicaciones aeroportuarias bajo condiciones climáticas típicas de Quito. La Gráfica 18 confirma dependencia frecuencial consistente, donde el incremento del módulo con la frecuencia sigue patrones predecibles de comportamiento viscoelástico. El valor máximo de 5638.5 MPa a 25 Hz proporciona rigidez adecuada para resistir cargas de tráfico aeronáutico, mientras que 1132.1 MPa a 0.1 Hz indica flexibilidad apropiada para cargas estáticas prolongadas.

Esta caracterización a temperatura ambiente valida que el núcleo 2, despite la anomalía a -10°C, mantiene capacidad estructural apropiada bajo condiciones operacionales normales del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, donde las temperaturas raramente descienden por debajo de 4°C debido a la ubicación ecuatorial y altitud de la ciudad.

Evaluación a Temperatura Elevada (37°C)

Los resultados de la Tabla 62 a 37°C muestran módulos dinámicos de 406.2-1714.1 MPa, evidenciando transición controlada hacia comportamiento más viscoso característica de temperaturas elevadas. La Gráfica 19 demuestra reducción de la pendiente frecuencia-módulo comparada con temperaturas menores, indicando menor sensibilidad a la velocidad de carga a medida que aumenta la temperatura. Esta respuesta termomecánica es técnicamente apropiada ya que proporciona mayor capacidad de acomodación de movimientos térmicos sin generar tensiones críticas en la estructura del pavimento.

La variabilidad observada en algunos puntos de la curva (particularmente el valor de 576.2 MPa a 0.5 Hz comparado con 540.7 MPa a 1 Hz) sugiere cierta irregularidad en la respuesta que puede estar relacionada con la heterogeneidad microestructural evidenciada en la falla a -10°C.

Comportamiento Crítico a Alta Temperatura (54°C)

La Tabla 63 documenta comportamiento a 54°C con módulos dinámicos altamente variables entre 225.0-582.4 MPa, evidenciando respuesta irregular característica de condiciones térmicas extremas. La Gráfica 20 muestra dispersión significativa con valor mínimo crítico de 225.0 MPa a 10 Hz, sugiriendo posible inestabilidad del material bajo estas condiciones severas. Esta variabilidad es más pronunciada que la observada en otros núcleos, confirmando que el núcleo 2 presenta mayor sensibilidad a condiciones experimentales extremas.

Los valores registrados, aunque irregulares, mantienen magnitudes que permiten cierta capacidad estructural residual a esta temperatura excepcional, que es improbable en las condiciones climáticas de Quito, pero proporciona información sobre los límites operacionales del sistema modificado con PCR.

Implicaciones para Control de Calidad y Reproducibilidad

El comportamiento del núcleo 2 resalta la importancia crítica del control de calidad durante la producción de mezclas modificadas con PCR, especialmente regarding los parámetros de mezclado, distribución de materiales, y procedimientos de compactación. La falla a -10°C seguida de recuperación a temperaturas superiores sugiere que while la modificación con 1.5% de PCR es técnicamente viable, requiere protocolos estrictos para asegurar reproducibilidad experimental. Los resultados válidos obtenidos a 4°C, 21°C y 37°C confirman que cuando las condiciones de preparación y ensayo son apropiadas, las mezclas modificadas pueden proporcionar desempeño confiable para aplicaciones aeroportuarias críticas, aunque la variabilidad observada indica necesidad de mayor rigor en los procesos de control de calidad para implementación a escala industrial.

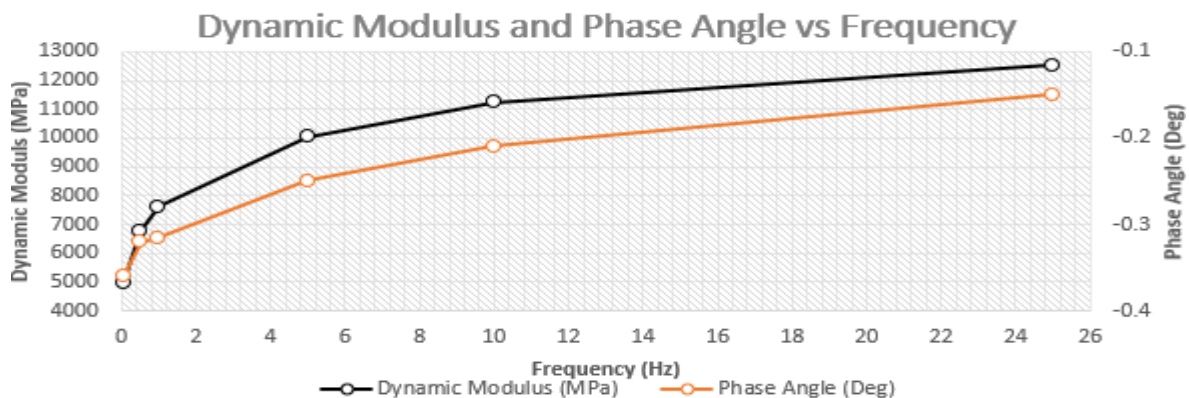
- Núcleo 3:

Tabla 64. *Módulo Dinámico (-10°C), Núcleo 3*

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	12543.2	-10
10	11237.3	-10
5	10034.9	-10
1	7625.0	-10
0.5	6763.9	-10
0.1	4945.5	-10

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 21. *Módulo Dinámico vs Frecuencia (-10°C), Núcleo 3*



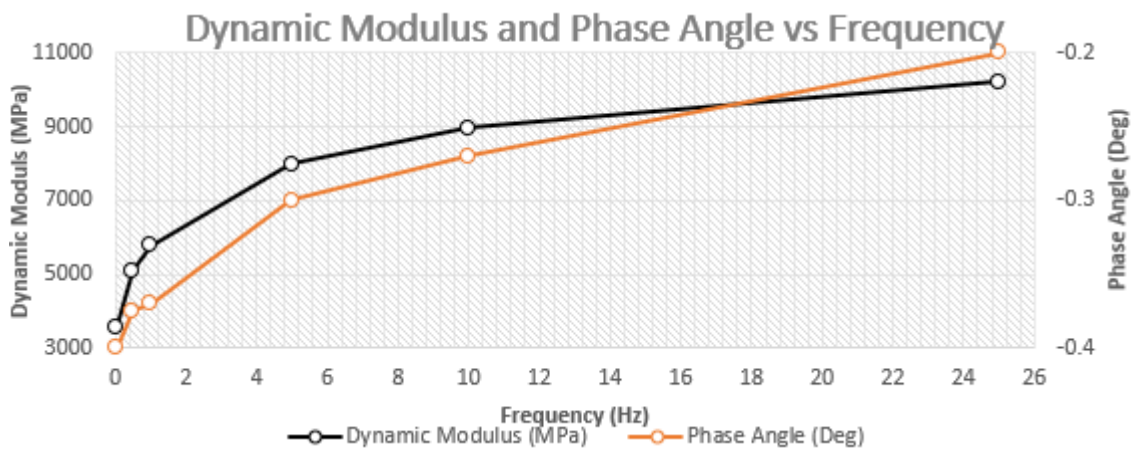
Fuente: Autores (2025)

Tabla 65. Módulo Dinámico (4°C), Núcleo 3

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	10226.2	4
10	8963.9	4
5	7977.2	4
1	5770.1	4
0.5	5095.7	4
0.1	3582.3	4

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 22. Módulo Dinámico vs Frecuencia (4°C), Núcleo 3



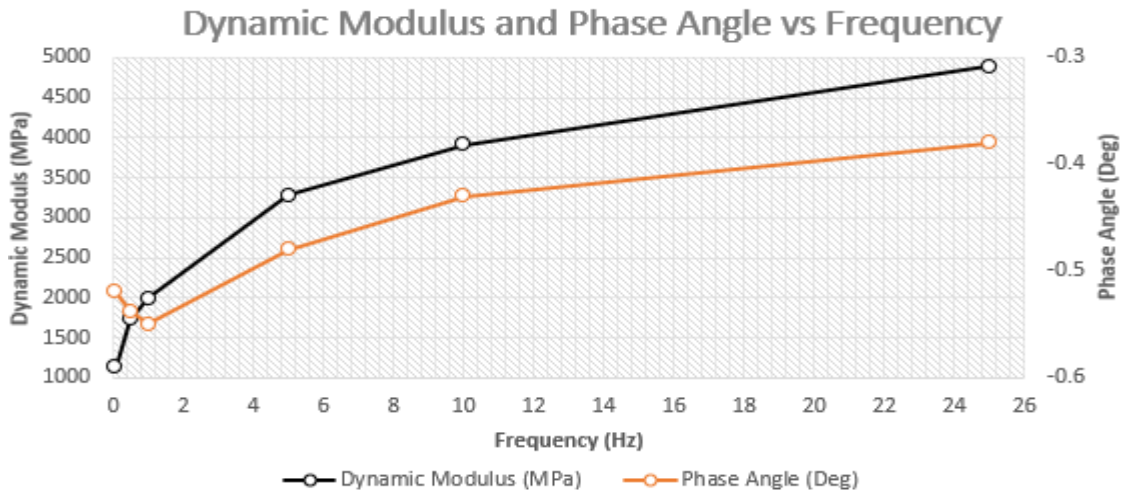
Fuente: Autores (2025)

Tabla 66. Módulo Dinámico (21°C), Núcleo 3

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	4881.8	21
10	3907.6	21
5	3280.5	21
1	1988.1	21
0.5	1723.5	21
0.1	1124.8	21

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 23. Módulo Dinámico vs Frecuencia (21°C), Núcleo 3



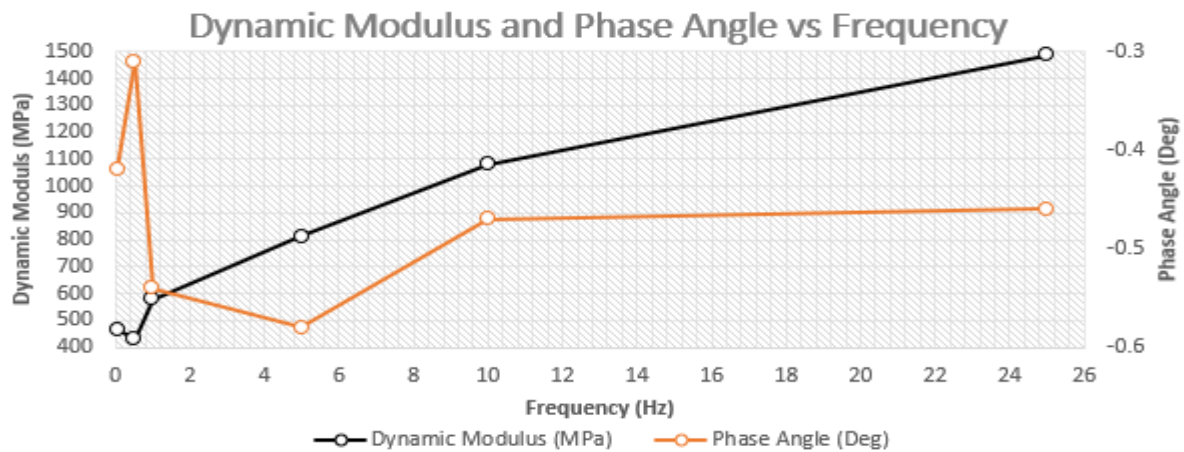
Fuente: Autores (2025)

Tabla 67. Módulo Dinámico (37°C), Núcleo 3

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	1488.8	54
10	1080.5	54
5	812.7	54
1	579.2	54
0.5	431.5	54
0.1	466.3	54

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 24. Módulo Dinámico vs Frecuencia (37°C), Núcleo 3



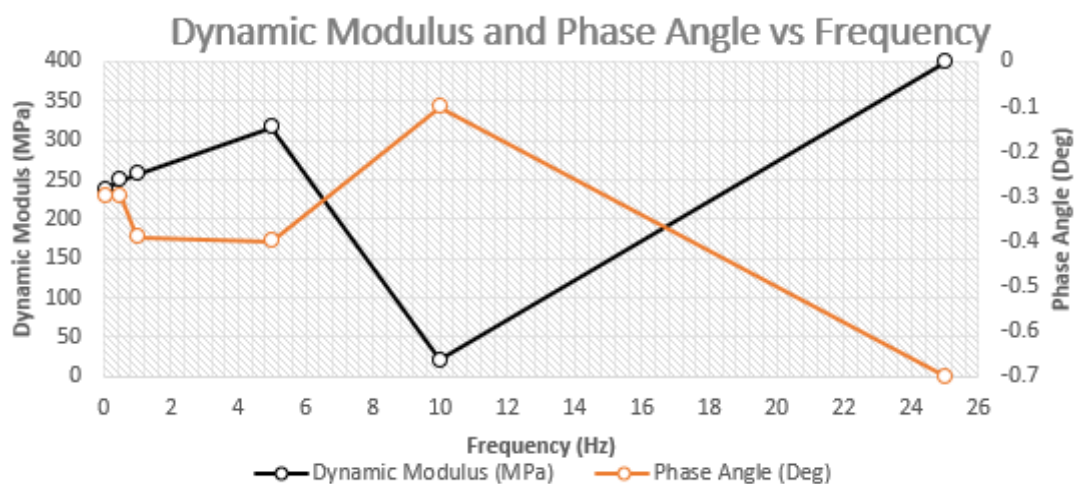
Fuente: Autores (2025)

Tabla 68. Módulo Dinámico (54°C), Núcleo 3

Frecuencia [Hz]	Módulo dinámico [Mpa]	Temperatura [°C]
25	399.7	54
10	21.3	54
5	316.2	54
1	256.5	54
0.5	249.4	54
0.1	237.6	54

Fuente: Autores (2025)

Gráfica 25. Módulo Dinámico vs Frecuencia (54°C), Núcleo 3



Fuente: Autores (2025)

La Tabla 64 demuestra comportamiento experimental exitoso del núcleo 3 a -10°C, con módulos dinámicos que varían sistemáticamente desde 4945.5 MPa (0.1 Hz) hasta 12543.2 MPa (25 Hz). Esta caracterización completa contrasta favorablemente con la falla experimental del núcleo 2 a la misma temperatura, evidenciando mayor integridad estructural y homogeneidad en la distribución del 1.5% de PCR. La Gráfica 21 confirma tendencia monótonica consistente con el comportamiento viscoelástico esperado, donde el incremento progresivo del módulo con la frecuencia refleja la respuesta característica de materiales asfálticos modificados bajo condiciones de carga dinámica a baja temperatura.

Los valores registrados son aproximadamente 17% menores que los del núcleo 1, diferencia que se encuentra dentro de rangos aceptables para variabilidad experimental en mezclas modificadas con materiales reciclados. La capacidad de obtener mediciones válidas a todas las frecuencias evaluadas confirma la estabilidad microestructural del núcleo 3 y valida su representatividad para caracterización del comportamiento a temperatura extrema baja, condición relevante para evaluación de resistencia al agrietamiento térmico en aplicaciones aeroportuarias.

Transición Térmica Controlada a 4°C

Los resultados de la Tabla 65 a 4°C evidencian transición controlada con módulos dinámicos de 3582.3-10226.2 MPa, representando reducción del 18% en el valor máximo comparado con -10°C. La Gráfica 22 mantiene pendiente y comportamientos consistentes con la caracterización a temperatura inferior, confirmando que la modificación con PCR no introduce discontinuidades en la respuesta termomecánica durante transiciones térmicas típicas del clima andino ecuatoriano. Esta estabilidad durante variaciones térmicas es fundamental para garantizar desempeño predecible durante ciclos diurnos-nocturnos característicos de operaciones aeroportuarias continuas.

La progresión ordenada de valores desde 10226.2 MPa a 25 Hz hasta 3582.3 MPa a 0.1 Hz demuestra sensibilidad apropiada a la velocidad de carga, característica esencial para pavimentos que deben resistir tanto impactos dinámicos de aterrizaje como cargas estáticas prolongadas de aeronaves estacionadas.

Comportamiento Óptimo a Temperatura Operacional (21°C)

La Tabla 66 documenta comportamiento a 21°C con módulos dinámicos de 1124.8-4,881.8 MPa, valores apropiados para condiciones operacionales típicas de Quito. La Gráfica 23 confirma dependencia frecuencial predecible, donde el módulo de 4881.8 MPa a 25 Hz proporciona rigidez suficiente para operaciones críticas de aterrizaje y despegue, mientras que 1124.8 MPa a 0.1 Hz indica flexibilidad apropiada para acomodar cargas estáticas variables. Esta caracterización valida que el núcleo 3 mantiene balance

óptimo entre resistencia estructural y capacidad de deformación bajo condiciones climáticas representativas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre.

Los valores son ligeramente menores que los del núcleo 2 a la misma temperatura (diferencia del 13%), sugiriendo variabilidad natural entre probetas que se mantiene dentro de rangos técnicamente aceptables para mezclas modificadas con materiales reciclados.

Respuesta Controlada a Temperatura Elevada (37°C)

Los datos de la Tabla 67 a 37°C revelan módulos dinámicos de 431.5-1488.8 MPa, evidenciando transición apropiada hacia comportamiento más viscoso. La Gráfica 24 muestra reducción ordenada de la rigidez con menor dispersión comparada con el núcleo 2, indicando mayor estabilidad estructural del núcleo 3 bajo condiciones térmicas elevadas. El valor máximo de 1488.8 MPa a 25 Hz mantiene capacidad estructural adecuada, mientras que la flexibilidad con frecuencias menores facilita acomodación de expansiones térmicas sin generar tensiones críticas.

La progresión sistemática de valores confirma comportamiento predecible que facilita modelado computacional y predicción de desempeño a largo plazo, aspectos fundamentales para el diseño de pavimentos aeroportuarios donde la confiabilidad del comportamiento mecánico es crítica en la seguridad operacional.

Comportamiento a Temperatura Crítica (54°C)

La Tabla 68 documenta respuesta a 54°C con módulos dinámicos altamente variables entre 21.3-399.7 MPa, incluyendo un valor crítico extremo de 21.3 MPa a 10 Hz. La Gráfica 25 evidencia esta anomalía que sugiere limitaciones del material o del equipo de ensayo bajo condiciones térmicas extremas. Los valores a otras frecuencias (237.6-316.2 MPa) mantienen magnitudes más consistentes, indicando que la mezcla conserva cierta capacidad estructural residual incluso bajo estas condiciones excepcionales. El comportamiento anómalo a 54°C, similar al observado en otros núcleos, confirma que esta temperatura representa el límite operacional del sistema modificado con PCR,

aunque es poco relevante para las condiciones climáticas de Quito donde las temperaturas superficiales raramente alcanzan niveles extremos.

Evaluación de Confiabilidad y Representatividad

El análisis integral del núcleo 3 confirma comportamiento más confiable y predecible comparado con el núcleo 2, especialmente evidente en la caracterización exitosa a -10°C y menor variabilidad a temperaturas elevadas. Las Tablas 64-68 demuestran transición termomecánica ordenada y sistemática, confirmando que cuando los parámetros de preparación y compactación son apropiados, las mezclas modificadas con 1.5% de PCR pueden proporcionar desempeño consistente y predecible.

La capacidad del núcleo 3 de mantener integridad experimental a través del rango térmico completo (excepto la anomalía puntual a 54°C) valida la viabilidad técnica de la modificación con residuos de neumáticos de avión para aplicaciones aeroportuarias críticas. Los resultados proporcionan base sólida para predicción de desempeño y diseño estructural, confirmando que las mezclas modificadas pueden cumplir con los requisitos de rigidez, flexibilidad y durabilidad requeridos para infraestructuras del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, donde la consistencia del comportamiento mecánico bajo condiciones térmicas variables es fundamental para garantizar seguridad operacional y viabilidad económica a largo plazo.

5. Resultados y Discusión

5.1. Análisis de las Pruebas de Caracterización de los Materiales

5.1.1. Agregados Pétreos

A continuación, presentamos el análisis técnico de los ensayos que se realizaron a los agregados que fue entregado por la planta Naranjo-López y los cuales están descritos en la Tabla 14.

La evaluación granulométrica de los agregados grueso (3/4"), intermedio (1/2") y fino se realizó conforme a la norma ASTM C136, y los resultados se representaron en curvas granulométricas. Se verificó que la mezcla de agregados se encuentra dentro de los rangos establecidos por la especificación MOP-001-F-2002, lo cual garantiza una adecuada distribución de tamaños de partículas. Esta conformidad es esencial para asegurar una buena compactación, estabilidad estructural y resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

Tabla 69. Resultados de la *Granulometría, Faja de 3/4"*

Tamiz	%Pasante	Límite Superior	Límite Inferior	Cumple con la MOP-001-F-2002
1"	100	100	100	Si
3/4"	96.33	100	90	Si
3/8"	71.66	80	56	Si
N°4	49.17	65	35	Si
N°8	34.52	49	23	Si
N°50	10.11	19	5	Si
N°200	4.71	8	2	Si

Fuente: Autores (2025)

El porcentaje de absorción de los agregados nos dice que los agregados presentan una porosidad moderada, lo cual puede influir en la cantidad de ligante necesario para

recubrir adecuadamente las partículas. La absorción dentro de estos rangos es aceptable, aunque se debe considerar en el diseño del contenido óptimo de asfalto para evitar mezclas secas o con exceso de ligante.

Tabla 70. Resultados de la *Absorción de los Agregados*

Agregado	% Absorción
Material 1/2"	4.297
Material 3/4"	2.248
Arena	3.184

Fuente: Autores (2025)

El ensayo de abrasión (Los Ángeles), realizado bajo la norma ASTM C131, arrojó un valor de 23% en la gradación C y un 20.4% en la gradación B, cumpliendo con el límite máximo del 40% establecido por la normativa MOP. Este resultado refleja una buena resistencia al desgaste de los agregados, lo cual es fundamental para mantener la integridad estructural del pavimento frente a cargas repetitivas y tráfico pesado.

Tabla 71. Resultados del *Ensayo de Abrasión*

Gradación	Resultado	% Máximo	Límite Inferior	Cumple con la ASTM C 131
C	23	40	100	Si
B	20.40	40	90	Si

Fuente: Autores (2025)

El agregado fino, con un resultado del 71% en el ensayo de equivalente de arena (ASTM D 2419), cumple satisfactoriamente con el límite mínimo requerido del 50%, lo que indica una baja presencia de finos plásticos o arcillas y una adecuada resistencia a la degradación. Este resultado garantiza que el material es apto para su uso en mezclas asfálticas, cumpliendo con los estándares de calidad.

Tabla 72. Resultados del *Ensayo de Equivalente de Arena*

Material	Resultado	% Mínimo	Límite Inferior	Cumple con la ASTM D 2419
Agregado fino	71	50	100	Si

Fuente: Autores (2025)

5.1.2. Asfalto AC-20

A continuación, presentamos el análisis técnico de los ensayos que se realizaron al asfalto AC-20 que fue entregado por la planta Naranjo-López y los cuales están descritos en la Tabla 22.

Previo a elaborar las mezclas asfálticas con PCR, se realizó la caracterización del asfalto AC-20 para así verificar que este cumpla los parámetros establecidos por la normativa vigente y así evaluar la compatibilidad con la adición del 1.5% de PCR. Los ensayos realizados permitieron obtener parámetros fundamentales como lo son la penetración, punto de ablandamiento, viscosidad rotacional y ductilidad, los cuales confirman que el ligante cumple con las especificaciones técnicas requeridas para ser utilizado para la pavimentación y soportar cargas de tráfico pesado.

El material registró un valor de 247.58 °C, superando significativamente el requisito mínimo de 232 °C establecido por las normas. Este resultado demuestra una excelente seguridad térmica, ya que el asfalto requiere temperaturas considerablemente altas para liberar vapores inflamables. Al exceder en 15.58 °C el límite inferior, se garantiza un amplio margen de seguridad durante el almacenamiento, transporte y aplicación del material en procesos de mezclado en caliente.

Tabla 73. Resultados del *Ensayo de Punto de Inflamación*

Material	Resultado	NTE INEN 2515		ASTM D 3381		Cumplimiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	INEN	ASTM
Asfalto AC-20	247.58	232	-	232	-	Cumple	Cumple

Fuente: Autores (2025)

El ligante asfáltico presentó un valor de 0.518 Pa*s, considerablemente inferior al límite máximo permitido de 3 Pa*s. Este resultado indica que el material posee una baja viscosidad, lo que se traduce en una excelente trabajabilidad durante los procesos de mezclado en planta y compactación en campo. Una viscosidad en este rango facilita el recubrimiento uniforme de los agregados y una adecuada compactación, sin comprometer la cohesión del material.

Tabla 74. Resultados del *Ensayo de Viscosidad*

Material	Resultado	NTE INEN 2515		ASTM D 3381		Cumplimiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	INEN	ASTM
Asfalto AC-20	0.518	-	3	-	3	Cumple	Cumple

Fuente: Autores (2025)

El material presentó un valor de 40 °C, el cual se encuentra dentro del rango aceptable establecido por la norma (mínimo 30 °C y máximo 80 °C). Este resultado indica que el asfalto tiene una resistencia adecuada a la deformación permanente bajo temperaturas moderadas, equilibrando su comportamiento térmico: por debajo de los 30 °C podría volverse demasiado rígido y propenso al agrietamiento, mientras que cerca de los 80 °C sería excesivamente blando, aumentando el riesgo de deformaciones plásticas. Un punto de ablandamiento de 40 °C sugiere que el material mantendrá su consistencia y capacidad de soporte en climas con variaciones térmicas comunes, sin perder flexibilidad a bajas temperaturas ni estabilidad a medias temperaturas.

Tabla 75. Resultados del *Ensayo de Punto de Ablandamiento*

Material	Resultado	NTE INEN 2515		ASTM D 3381		Cumplimiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	INEN	ASTM
Asfalto AC-20	40	30	80	30	80	Cumple	Cumple

Fuente: Autores (2025)

El valor del ensayo de penetración es de 61.3 1/10 mm, el valor mínimo según la normativa es de 60, así que el asfalto cumple con este valor, este resultado sugiere que el asfalto mantiene un equilibrio adecuado entre rigidez y flexibilidad, necesario para resistir cargas sin agrietarse.

Tabla 76. Resultados del *Ensayo de Penetración*

Material	Resultado	NTE INEN 2515		ASTM D 3381		Cumplimiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	INEN	ASTM
Asfalto AC-20	61.3	-	-	60	-	-	Cumple

Fuente: Autores (2025)

El material analizado alcanzó un valor de 144.25 cm, superando ampliamente el límite mínimo requerido de 50 cm establecido por la norma. Este resultado indica una excelente ductilidad, lo que significa que el material tiene una alta capacidad de deformación sin fracturarse, una propiedad deseable en mezclas asfálticas para resistir agrietamientos por fatiga o cambios térmicos. Si bien cumplir con el mínimo es aceptable, un valor tan elevado (casi 3 veces el límite) sugiere que el material es flexible y resistente, lo que podría mejorar su desempeño en condiciones extremas.

Tabla 77. Resultados del *Ensayo de Ductilidad*

Material	Resultado	NTE INEN 2515		ASTM D 3381		Cumplimiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	INEN	ASTM
Asfalto AC-20	144.25	50	-	50	-	Cumple	Cumple

Fuente: Autores (2025)

El asfalto analizado presentó una pérdida por envejecimiento de 0.038%, valor significativamente inferior al límite máximo permitido del 1%. Esto indica una excepcional estabilidad térmica, ya que el material experimentó una mínima degradación durante el proceso de envejecimiento simulado en el horno de corto plazo (RTFO). Tal desempeño sugiere que el asfalto conservará sus propiedades originales de manera óptima durante el mezclado y la colocación, reduciendo riesgos de fisuramiento o endurecimiento prematuro.

Tabla 78. Resultados del *Ensayo RTFO*

Material	Resultado	NTE INEN 2515		ASTM D 3381		Cumplimiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	INEN	ASTM
Asfalto AC-20	0.038	-	1.00	-	1.00	Cumple	Cumple

Fuente: Autores (2025)

El ensayo de la determinación de las propiedades reológicas del ligante asfáltico usando un reómetro dinámico de corte para la una muestra da un valor de 1.25 kPa superando el valor mínimo que es de 1.00 kPa para un temperatura de 64 °C, para la segunda muestra nos dio 1520 kPa valor que está por debajo del máximo que es de 5000 kPa para una temperatura de 25 °C, y de la tercera muestra es de 5.17 valor que está por encima

del mínimo que es de 2.20 kPa para una temperatura de 64 °C, todos estos valores cumplen con lo establecido en la norma AASHTO M 320, por lo que decimos que el grado verificado es del PG 64-22.

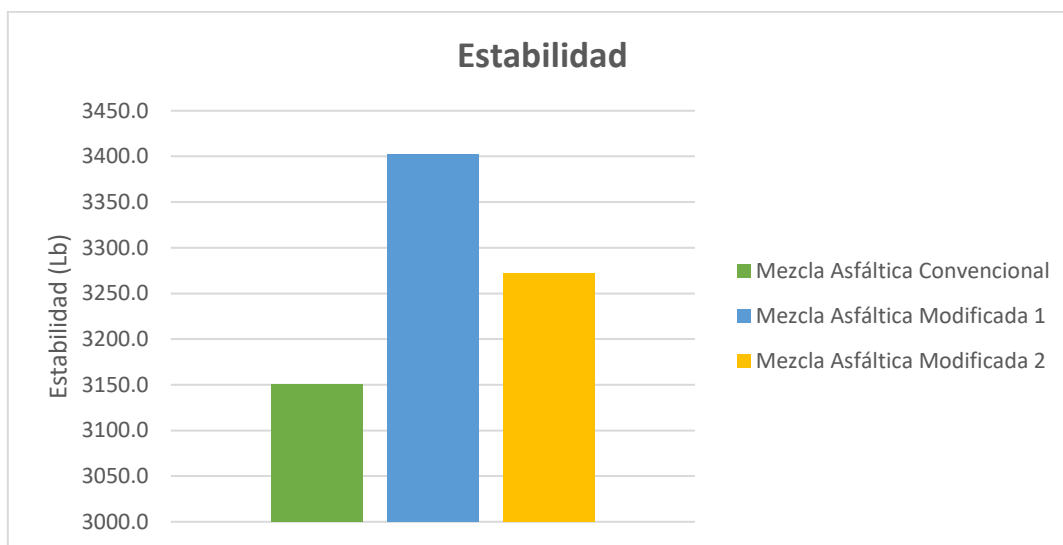
Tabla 79. Resultados de las *Propiedades Reológicas*

Material	Resultado	AASHTO M 320		Cumplimiento
		Mínimo	Máximo	AASHTO M 320
	1.25	1.00	-	Cumple
Asfalto AC-20	1520	-	5000	Cumple
	5.17	2.20	-	Cumple

Fuente: Autores (2025)

5.2. Análisis del Ensayo Marshall

Gráfica 26. Comparación del Valor de Estabilidad

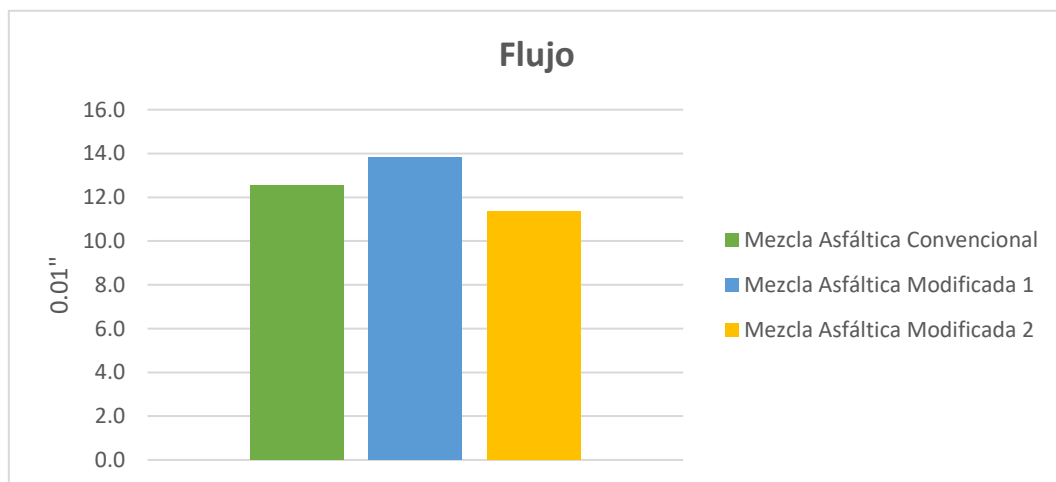


Fuente: Autores (2025)

El valor obtenido para la estabilidad en una mezcla asfáltica convencional es de 3150.6 lb, mientras que para la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho reciclado es de 3402.0 lb y 3271.4 lb. Como se puede observar todos estos valores superan ampliamente el valor mínimo establecido por la MOP-001-F-2002 que es de 2200 lb, esto nos indica que se tiene un buen desempeño estructural en términos de resistencia a la deformación plástica bajo carga.

Se puede decir que las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho reciclado no solo cumplen con la norma, sino que presentan una ligera mejora en la estabilidad respecto a la mezcla convencional, lo cual sugiere que la modificación con caucho puede aumentar la rigidez y resistencia del material sin comprometer su flexibilidad.

Gráfica 27. Comparación del Valor de Flujo



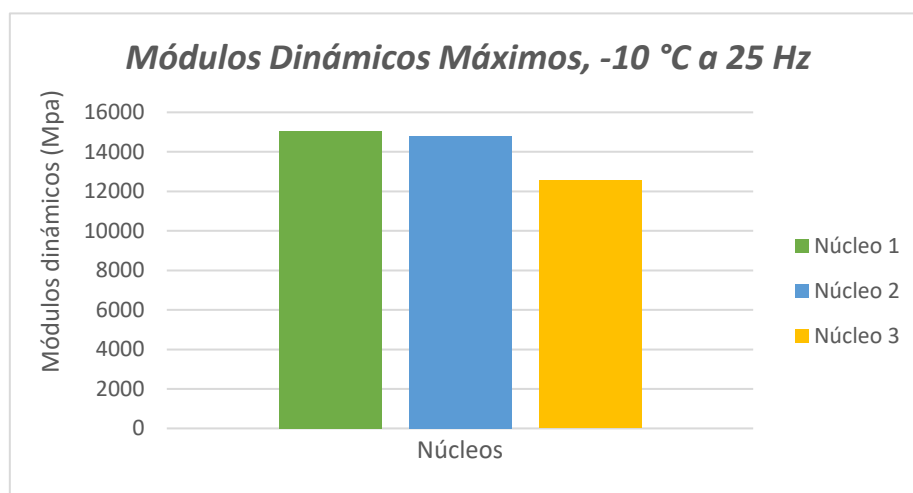
Fuente: Autores (2025)

De acuerdo con la especificación MOP-001-F-2002, para vías con tráfico muy pesado, el rango aceptable de flujo Marshall debe encontrarse entre 8 y 14 (0.01"). El flujo representa la deformación plástica que experimenta la muestra antes de fallar, y está directamente relacionado con la flexibilidad de la mezcla asfáltica. El valor del flujo para la mezcla asfáltica convencional es de 12.5, y para la mezcla asfáltica modificada fueron de 13.8 y 11.4, como se puede observar estos valores se encuentran dentro del rango establecido por la MOP, lo que indica que poseen un comportamiento adecuado frente a la deformación bajo carga. Además, los valores ligeramente altos en las mezclas modificadas sugieren una mayor capacidad de deformación plástica, lo cual es beneficioso en zonas con alta variabilidad térmica o sometidas a esfuerzos repetitivos, ya que reduce el riesgo de fisuración.

5.3. Análisis de los Ensayos de Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas con el 1.5% de PCR

A continuación, se presentarán gráficas con los valores de los módulos dinámicos comparando los valores máximos obtenidos de los tres núcleos ensayados para las temperaturas donde existieron variabilidades demasiado grandes, no se obtuvieron resultados del ensayo o se obtuvieron valores considerados atípicos.

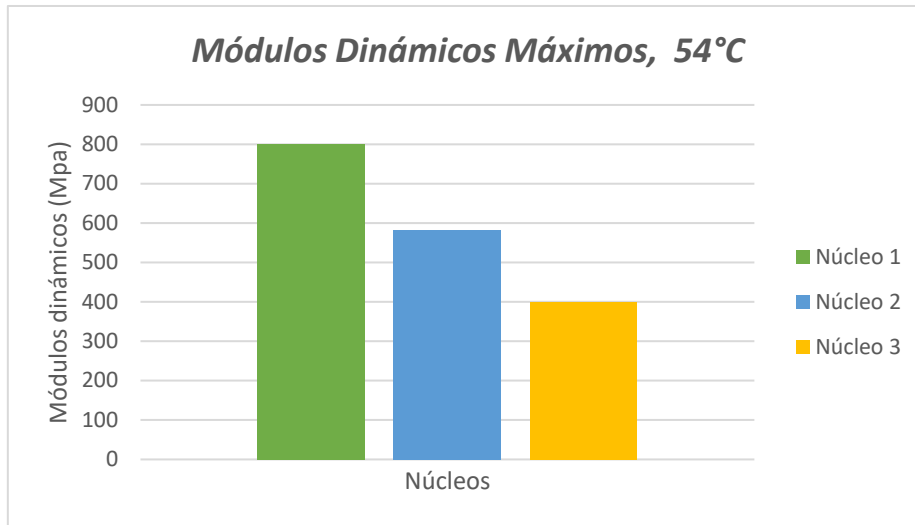
Gráfica 28. Módulos Dinámicos Máximos a una Temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: Autores (2025)

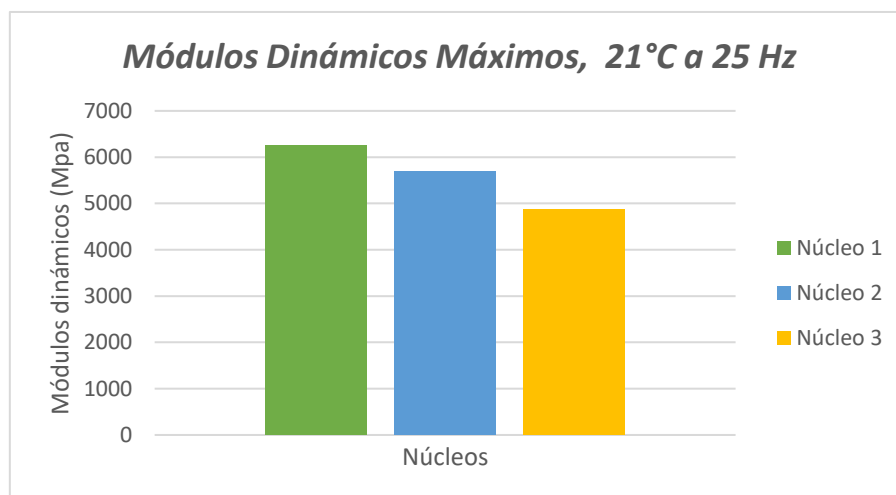
Para una temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ se obtuvieron los valores de 15060.8 MPa, 14853.9 MPa y 12543.2 MPa, como valores máximos del módulo dinámico para una frecuencia de 25 Hz, cabe mencionar que para el núcleo 2 solo se obtuvo el valor máximo de 14853.9, mientras que para las demás frecuencias no se obtuvieron valores, esto es debido a que la muestra a esta temperatura registra deformaciones fuera de rango.

Como se puede observar en la gráfica los tres núcleos muestran valores altos, lo que nos indica que tienen un buen desempeño en frío, a excepción del núcleo 2 que no pudo completar el ensayo en frecuencias menores a 25 Hz debido a deformaciones excesivas, lo que nos sugiere posibles defectos en la muestra.

Gráfica 29. Módulos Dinámicos Máximos a una Temperatura de 54 °C

Fuente: Autores (2025)

Como es de esperarse los valores del módulo dinámico a una temperatura de 54 °C disminuyen esto debido a las propiedades del asfalto, éste pierde 90% de su rigidez si es comparado con una temperatura de -10 °C, por lo que la muestra se vuelve altamente viscosa con poca recuperación elástica, en Quito es muy improbable que las temperaturas lleguen a 54 °C por lo que se tomó una temperatura de 21 °C de referencia.

Gráfica 30. Módulos Dinámicos Máximos a una Temperatura de 21 °C

Fuente: Autores (2025)

La temperatura máxima promedio en Quito suele rondar 20 o 21 °C por lo que vamos a analizar el valor de módulo dinámico para esta temperatura, para el núcleo 1 se tiene un valor de 6025.7 MPa, para el núcleo 2 de 5638.5 MPa y para el núcleo 3 de 4881.8 MPa para una frecuencia de 25 Hz, estos valores nos indican que el asfalto modificado con PCR tiene una rigidez adecuada para resistir el tráfico vehicular sin deformaciones excesivas.

Desempeño de Mezclas Modificadas - Método Marshall

Los resultados del ensayo Marshall demuestran superioridad de las mezclas modificadas con 1.5% de PCR comparadas con mezclas convencionales. La Gráfica 26 evidencia estabilidades de 3402.0 lb y 3271.0 lb para mezclas modificadas versus 3150.6 lb para mezclas normales, todas superando el requisito mínimo de 2200 lb establecido por MOP-001-F-2002. Esta mejora indica que la modificación con PCR incrementa la rigidez y resistencia sin comprometer flexibilidad. La Gráfica 27 muestra flujos de 13.8 y 11.4 para mezclas modificadas versus 12.5 para mezclas normales, manteniéndose dentro del rango especificado de 8 - 14. Los valores ligeramente superiores en mezclas modificadas sugieren mayor capacidad de deformación plástica, beneficiosa para zonas con variabilidad térmica alta o esfuerzos repetitivos.

Comportamiento Termomecánico - Ensayos de Módulo Dinámico

Los ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas proporcionan caracterización completa del comportamiento viscoelástico de las mezclas modificadas. La Gráfica 28 documenta módulos dinámicos excepcionales a -10°C: 15060.8 MPa (núcleo 1), 14853.9 MPa (núcleo 2) y 12543.2 MPa (núcleo 3) a 25 Hz, confirmando rigidez superior a temperaturas bajas. La anomalía del núcleo 2 (valores N/A para frecuencias menores) sugiere posibles defectos de muestra que no comprometen la viabilidad general de la modificación. La Gráfica 29 muestra reducción esperada a 54°C donde los módulos disminuyen 90% comparado con -10°C, confirmando transición hacia comportamiento viscoso a temperaturas extremas. La Gráfica 27 presenta valores apropiados a 21°C (temperatura operacional de Quito): 6025.7 MPa, 5638.5 MPa y 4881.8 MPa, confirmando rigidez adecuada para resistir tráfico vehicular sin deformaciones excesivas.

Validación de la Modificación con PCR

Los resultados integrales confirman que la incorporación del 1.5% de PCR como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50 es técnicamente viable y proporciona beneficios estructurales medibles. Las mezclas modificadas mantienen o mejoran propiedades mecánicas fundamentales mientras contribuyen a objetivos de sostenibilidad ambiental. La consistencia observada en la mayoría de ensayos, exceptuando anomalías puntuales atribuibles a variabilidad experimental, valida la reproducibilidad del proceso de modificación.

Implicaciones para Aplicaciones Aeroportuarias

El cumplimiento con especificaciones técnicas, combinado con mejoras en estabilidad Marshall y comportamiento termomecánico apropiado, confirma que la modificación con residuos de neumáticos de avión no compromete la seguridad operacional ni el desempeño estructural. Los resultados proporcionan base técnica sólida para implementación de tecnologías sostenibles en pavimentación aeroportuaria, contribuyendo simultáneamente a la gestión responsable de residuos especiales y el desarrollo de infraestructuras de alto desempeño requeridas para operaciones aeronáuticas críticas.

6. Conclusiones

- La incorporación del 1.5% de polvo de caucho reciclado (PCR) proveniente de neumáticos de aeronaves como reemplazo del material pasante del tamiz No. 50 ha demostrado ser técnicamente viable para mezclas asfálticas destinadas a aplicaciones aeroportuarias críticas. Los resultados experimentales confirman que esta modificación no solo mantiene las propiedades estructurales fundamentales de las mezclas convencionales, sino que proporciona mejoras medibles en parámetros clave como la estabilidad Marshall, que registró incrementos del 7.97% y 3.82%, alcanzó valores de 3402.0 lb y 3271.0 lb comparados con 3150.6 lb de mezclas convencionales. Todos los valores superan ampliamente el requisito mínimo de 2200 lb establecido por MOP-001-F-2002, validando la capacidad estructural para soportar cargas aeronáuticas extremas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre.
- Las mezclas asfálticas modificadas con 1.5% de PCR cumplen integralmente con todas las especificaciones técnicas establecidas por la normativa MOP-001-F-2002 para aplicaciones de tráfico muy pesado. Los parámetros volumétricos críticos como vacíos de aire (3.5 - 3.7%), vacíos en agregado mineral (15.5 - 15.8%) y relación filler/betún (0.890 - 0.896) se mantienen dentro de los rangos especificados. El flujo Marshall de 11.4 - 13.8 (0.01") permanece apropiadamente dentro del rango de 8-14, indicando deformabilidad controlada que proporciona flexibilidad sin comprometer estabilidad estructural. Este cumplimiento normativo valida la implementación de la tecnología en infraestructuras críticas donde la conformidad técnica es fundamental para la seguridad operacional.
- La comparación metodológica entre Marshall y Superpave confirma la superioridad del sistema Superpave para caracterización completa de mezclas asfálticas modificadas destinadas a aplicaciones críticas. Mientras que Marshall proporciona parámetros empíricos básicos (estabilidad:

3150.6 lb; flujo: 12.5), el método Superpave permite evaluación termomecánica integral mediante ensayos de módulo dinámico que revelan comportamiento desde -10°C (15060.8 MPa) hasta 54°C , proporcionando caracterización predictiva del desempeño bajo condiciones operacionales variables. Los ensayos reológicos DSR confirmaron grado PG 64-22 del asfalto AC-20, apropiado para condiciones climáticas de Quito, con parámetros de 1.25 kPa, 1520 kPa y 5.17 kPa cumpliendo criterios AASHTO M 320.

- Los ensayos de módulo dinámico documentan comportamiento termomecánico superior de las mezclas modificadas con PCR a través del rango térmico operacional del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre. A 21°C (temperatura operacional típica de Quito), los módulos dinámicos de 6025.7 MPa, 5638.5 MPa y 4881.8 MPa confirman rigidez apropiada para resistir cargas aeronáuticas sin deformaciones excesivas. La transición controlada desde rigidez elevada a -10°C hasta flexibilidad apropiada a temperaturas superiores demuestra que la modificación con PCR optimiza el comportamiento viscoelástico, proporcionando resistencia estructural durante cargas críticas y flexibilidad durante variaciones térmicas diurnas-nocturnas característicos de operaciones aeroportuarias continuas.
- Los materiales provenientes de la Planta Naranja López y el asfalto AC-20 de EP Petroecuador demuestran calidad excepcional que supera los requisitos normativos básicos. Los agregados pétreos exhiben resistencia al desgaste superior (abrasión Los Ángeles: 20.4-23% versus límite de 40%) y granulometría apropiada para todas las fracciones evaluadas. El asfalto AC-20 presenta características reológicas superiores con punto de inflamación de 247.58°C (versus mínimo de 232°C), ductilidad excepcional de 144.25 cm (versus mínimo de 50 cm) y estabilidad térmica superior (RTFO: 0.038% versus máximo de 1.0%). Esta calidad de materiales locales facilita la implementación de tecnologías avanzadas sin dependencia de insumos importados, promoviendo sostenibilidad económica y ambiental.

- La reutilización de residuos de neumáticos de aeronaves representa una solución innovadora para la gestión responsable de desechos especiales en el sector aeroportuario ecuatoriano. Esta investigación demuestra que es posible transformar residuos problemáticos en materiales de valor agregado para infraestructuras críticas, contribuyendo simultáneamente a la reducción de acumulación de neumáticos fuera de uso y al desarrollo de pavimentos de alto desempeño. La iniciativa del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre en la provisión del PCR establece un precedente destacable para la economía circular en la industria aeroportuaria, donde la valorización de residuos se integra con objetivos de infraestructura sostenible.
- Esta investigación proporciona evidencia científica fundamental para el desarrollo de especificaciones técnicas nacionales que regulen el uso de materiales reciclados en mezclas asfálticas. Los resultados experimentales establecen parámetros de referencia para contenido de PCR (1.5%), procedimientos de caracterización, criterios de aceptación y metodologías de control de calidad aplicables a proyectos de infraestructura vial y aeroportuaria. La base de datos generada facilita la formulación de lineamientos normativos que promuevan la adopción sistemática de tecnologías sostenibles en el sector construcción, contribuyendo al desarrollo de marcos regulatorios que equilibren objetivos ambientales con requisitos de desempeño estructural.
- Los resultados validan la factibilidad técnica y económica para implementación de mezclas modificadas con PCR en proyectos reales de pavimentación aeroportuaria. La utilización de materiales locales, procesos de modificación relativamente simples y mejoras en desempeño estructural proporcionan argumentos sólidos para adopción por entidades como EPMMOP en infraestructuras críticas.

7. Recomendaciones

- Realizar investigaciones complementarias utilizando diferentes porcentajes de incorporación de polvo de caucho reciclado (PCR), tanto inferiores como superiores al 1.5% utilizado en este estudio. Esto permitirá establecer una curva de comportamiento mecánico que identifique el porcentaje óptimo en función de distintos criterios de desempeño, como estabilidad, deformación permanente, fatiga y durabilidad. Además, evaluar el efecto de estos porcentajes en diferentes tipos de tráfico y condiciones climáticas permitirá generar una base técnica sólida para futuras normativas locales sobre mezclas modificadas con materiales reciclados.
- Trasladar los resultados de laboratorio a aplicaciones reales mediante la construcción de tramos piloto en vías urbanas o aeroportuarias, utilizando mezclas modificadas con PCR diseñadas por ambos métodos (Marshall y Superpave). Estos ensayos permitirán verificar el comportamiento de las mezclas en condiciones reales de tráfico, humedad, temperatura y compactación, proporcionando información fundamental sobre el desempeño a largo plazo, el mantenimiento requerido y la interacción con otras capas estructurales del pavimento. La validación en campo será esencial para respaldar decisiones de política pública y contratación en obras de infraestructura vial sostenible.
- Si bien este estudio utilizó asfalto AC-20, es altamente recomendable evaluar la compatibilidad del polvo de caucho con otros tipos de ligantes, como asfaltos modificados con polímeros (SBS, EVA) o asfaltos con diferentes grados PG (Performance Grade) en el sistema Superpave. La interacción química y reológica entre el caucho y el ligante puede variar significativamente según la formulación, afectando propiedades críticas como la viscosidad, elasticidad, cohesión y resistencia al envejecimiento. Estudiar estas interacciones abrirá nuevas posibilidades para adaptar la mezcla a diferentes contextos técnicos y ambientales.

- Dado que actualmente en el Ecuador no existen especificaciones técnicas detalladas para el uso de polvo de caucho proveniente de neumáticos en mezclas asfálticas, se sugiere que las instituciones competentes (MTO, EPMMOP, GADs) desarrollen lineamientos normativos que regulen su uso, aplicación, control de calidad y desempeño. Estos lineamientos deberían considerar criterios de diseño volumétrico, condiciones de almacenamiento del caucho, límites de contenido máximo y ensayos de control durante la producción y colocación en obra. Una normativa técnica clara permitirá fomentar el uso masivo de esta tecnología con base científica y bajo condiciones estandarizadas.
- Integrar esta línea de investigación en estrategias más amplias de gestión de residuos sólidos no peligrosos, especialmente en el ámbito aeroportuario. Las autoridades ambientales y de transporte podrían incentivar la recolección sistemática, el procesamiento y la reutilización de neumáticos de avión al final de su vida útil, estableciendo convenios con aerolíneas y operadores aeroportuarios. La valorización de estos residuos como insumo para mezclas asfálticas contribuiría no solo al desarrollo de una infraestructura más sostenible, sino también al cumplimiento de metas de economía circular y reducción de emisiones en el sector construcción.

8. Referencias

- Al-Qadi, I. L., Carpenter, S. H., Roberts, G., Ozer, H., Aurangzeb, Q., Elseifi, M., & Trepanier, J. (2007). *Determination of usable residual asphalt binder in RAP*. Illinois Center for Transportation.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *AASHTO guide for design of pavement structures*. AASHTO.
- ASTM International. (2018). *ASTM D92-18: Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup*. ASTM International.
- Bhatti, A. A. (2021). Comparative study of Marshall and Superpave design methods for asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 307, 124-135.
- Cubas, A. L., Soares, J. B., & Cavalcante, A. L. (2024). Performance evaluation of asphalt mixtures incorporating recycled crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137-148.
- Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2024). Life cycle assessment of asphalt mixtures containing recycled materials: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 201, 107-119.
- Fransesqui, M. A., Yepes, J., & García-González, C. (2022). Performance of asphalt rubber mixtures in high traffic roads: Five-year field evaluation. *Construction and Building Materials*, 340, 127-138.
- Fransesqui, M. A., Yepes, J., García-González, C., & Gallego, J. (2023). Sustainable asphalt mixtures: Environmental and performance assessment of crumb rubber modified asphalt with warm mix additives. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136-149.
- Hajikarimi, P., Tehrani, F. F., Nejad, F. M., & Absi, J. (2022). Mechanical behavior of polymer-modified asphalt materials: An experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 363, 129-142.
- Instituto del Asfalto. (2009). *Manual del asfalto MS-4*. Instituto del Asfalto.
- Jin, X., Kou, C., Luo, S., Zhang, K., & Xiao, P. (2023). Field investigation and laboratory evaluation of asphalt pavement containing crumb rubber in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 208, 103-115.
- Khan, M. I., Sutanto, M. H., Bin Napiah, M., Zoorob, S. E., Al-Sabaei, A. M., Rafiq, W., & Memon, A. M. (2025). Optimization of asphalt pavement performance using binder film thickness as design criterion: A comparative analysis with Marshall and Superpave methods. *Construction and Building Materials*, 415, 134-146.
-

- Kim, Y. R., Lutif, J. E. S., Bhasin, A., & Little, D. N. (2010). *Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(2), 99-109.
- Leong, J. S., Ong, D. E., Liew, M. S., & Yusoff, N. I. M. (2023). Sustainable utilization of waste tire rubber crumb in asphalt concrete: A comprehensive review. *Sustainability*, 15(8), 6642.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F-2002*. MTOP.
- Nanjegowda, V. H., & Biligiri, K. P. (2023). Utilization of high content crumb rubber in developing modified asphalt binders for road applications. *Construction and Building Materials*, 393, 131-142.
- Omar, H. A., Katman, H. Y., Yusoff, N. I. M., Rahman, N. A., Mahmud, M. Z. H., & Pirzada, L. (2021). Performance comparison between Marshall and Superpave asphalt mix design methods. *International Journal of Engineering and Technology*, 13(2), 71-78.
- Riekstins, A., Haritonovs, V., Straupe, V., & Merijs-Meri, R. (2022). Life cycle cost analysis framework for road pavement considering performance degradation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 104, 103-115.
- Simon, D. A., Borrmann, D., Binder, C., Michels, A. F., & Pires, A. T. N. (2020). Microwave and thermomechanical devulcanization of ground tire rubber. *Polymer Degradation and Stability*, 175, 109-118.
- Wang, H., Liu, X., Zhang, H., Apostolidis, P., Skarpas, A., & Erkens, S. (2023). Optimization of temperature for short-term aging of asphalt rubber binder. *Construction and Building Materials*, 383, 131-142.
- Wu, S., Zhang, W., Shen, S., Mo, L., Li, C., & Zang, C. (2024). Investigation of microwave activation of crumb rubber for asphalt modification. *Construction and Building Materials*, 421, 135-147.
- Yazdipanah, F., Moghadas Nejad, F., & Khodaii, A. (2021). Rutting and fatigue resistance of asphalt mixtures containing crumb rubber and warm mix additives. *Construction and Building Materials*, 298, 123-134.
- Yu, H., Deng, G., Zhang, Z., Zhu, M., Gong, M., & Oeser, M. (2022). Workability of rubberized asphalt from a perspective of particle effect. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102-113.
- Zumrawi, M. M. E., & Sheikh Edrees, F. O. (2016). Experimental study of steel slag used in asphalt concrete mixtures. *Universal Journal of Materials Science*, 4(3), 42-49.