



Universidad
Mariana

Evaluación del comportamiento de una mezcla asfáltica drenante, con adiciones de pellets de plástico reciclado para implementarse en una carpeta de rodadura

Jair Sebastián Guerrero Guerrero

Jesús Alejandro Obando Paz

Maria José Trujillo Martínez

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
Universidad Mariana

2024

Evaluación del comportamiento de una mezcla asfáltica drenante, con adiciones de pellets de plástico reciclado para implementarse en una carpeta de rodadura

Jair Sebastián Guerrero Guerrero

Jesús Alejandro Obando Paz

Maria José Trujillo Martínez

Informe de investigación para optar al título de: Ingenieros Civiles

Mg. Jose Daniel Muñoz Martínez

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
Universidad Mariana

2024

Artículo 71: Los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva de los Educandos. Reglamento de Investigaciones y

Publicaciones Universidad Mariana

Contenido

	Pag.
Introducción	12
1. Resumen	13
1.1. Formulación del problema	14
1.2 Justificación	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4. Antecedentes	15
1.4.1 Antecedentes internacionales	15
1.4.2 Antecedentes nacionales	16
1.4.3 Antecedentes regionales	17
1.5. Metodología	18
1.5.1. Diseñar mezcla drenante para una carpeta de rodadura de pavimento asfáltico adiciones de pellets de plástico PET (Tereftalato de Polietileno)	19
1.5.1.1. Creación de pellets a partir de plástico PET.	19
1.5.1.2. Tamaño de partículas y pellets.	22
1.5.2. Porcentajes de partículas y pellets	22
1.5.3. División porcentaje de pellets de plástico PET	22
1.5.4 Fabricación de las muestras INV-E 760	24
1.5.4.1 Ensayo de desgaste INV E-218.	26
1.5.4.2 Ensayo de desgaste INV E-218 para PET.	27
1.5.4.3 Impurezas del agregado grueso INV E-237.	27
1.5.4.4 Índice de plasticidad INV E-125 y INV E-126.	28
1.5.4.5 Equivalente de arena INV E-133.	29
1.5.4.6 Partículas planas y alargadas INV E-230.	30
1.5.4.7 Ensayo de caras fracturadas INV E-227.	31
1.5.4.8 Ensayo de caras fracturadas INV E-227 para PET.	31

1.5.4.9 Gravedad específica de agregado grueso INV-E 223.	31
1.5.4.10 Gravedad específica de agregado fino INV-E 222.	32
1.5.4.11 Penetración de materiales bituminosos INV E-706.	33
1.5.4.12 Punto de inflamación y combustión INV E-709.	33
1.5.4.13 Punto de ablandamiento INV E-712.	34
1.5.4.14 Viscosímetro rotacional INV E-717.	34
1.5.4.15 Índice de Penetración en los cementos asfálticos I.N.V E – 724/213.	34
1.5.4.16 Diseño de experimento.	35
1.5.4.17 Granulometría.	36
1.5.4.18 Gravedad específica Bulk INV-E 734.	36
1.5.4.19 Vacíos de aire en la mezcla INV-E 736.	38
1.6. Determinar el comportamiento físico y mecánico de probetas de mezcla drenante adicionada con pellets de acuerdo con la normativa vigente.	39
1.6.1 Fabricación de briquetas de mezcla drenante modificada	40
1.6.2 Resistencia a la disgregación INV-E 760	40
1.6.3 Estabilidad y flujo INV-E 748	41
1.6.4 Prueba de permeabilidad (Artículo I.N.V.E 453/2013)	41
1.6.5 Ensayo de compresión simple INV-E 747	42
1.7 Analizar económicamente los resultados obtenidos de mezclas drenantes adicionadas con pellets en una carpeta de rodadura a comparación de mezclas convencionales.	42
1.7.1 Análisis de precios unitarios entre las dos mezclas	43
1.7.2 Exploración en costos de producción.	43
2. Resultados	44
2.1. Diseñar mezcla drenante para una carpeta de rodadura de pavimento asfáltico adiciones de pellets de plástico PET.	44
2.1.1 Caracterización de agregados	44
2.1.1.1 Ensayo de desgaste INV E-218 (Grava).	44
2.1.1.2 Ensayo de desgaste INV E-218 (PET).	45
2.1.1.3 Impurezas del agregado grueso INV E-237.	47
2.1.1.4 Índice de plasticidad INV E-125 y INV E-126.	48
2.1.1.5 Equivalente de arena INV E-133.	50

2.1.1.6 Partículas planas y alargadas INV E-230.	50
2.1.1.7 Ensayo de caras fracturadas INV E-227 (Grava).	51
2.1.1.8 Ensayo de caras fracturadas INV E-227 (PET).	51
2.1.1.9 Gravedad específica de agregado grueso INV-E 223.	51
2.1.1.10 Gravedad específica de agregado fino INV-E 222.	52
2.1.2 Caracterización de ligante asfáltico	55
2.1.2.1 Penetración de materiales bituminosos INV E-706.	55
2.1.2.2 Punto de inflamación y combustión INV E-709.	56
2.1.2.3 Punto de ablandamiento INV E-712.	57
2.1.2.4 Viscosidad cinemática INV E-715.	57
2.1.2.5 Índice de Penetración en los cementos asfálticos I.N.V E – 724/213.	58
2.1.2.6 Granulometría INV-E 213.	60
2.1.2.7 Gravedad específica Bulk INV-E 734.	62
2.1.2.8 Vacíos de aire en la mezcla INV-E 736.	66
2.2 Determinar el comportamiento físico y mecánico de probetas de mezcla drenante adicionada con pellets de acuerdo con la normativa vigente.	68
2.2.1 Resistencia a la disgregación para mezcla convencional y modificada	69
2.2.2 Estabilidad y flujo Marshall para mezcla convencional y modificada	72
2.2.3 Prueba de permeabilidad para mezcla drenante convencional y modificada	75
2.2.4 Ensayo de compresión simple para mezclas drenantes convencionales y modificadas	78
2.3 Analizar económicamente los resultados obtenidos de mezclas drenantes adicionadas con pellets en una carpeta de rodadura a comparación de mezclas convencionales.	81
2.3.1 Análisis de precios unitarios entre las dos mezclas	81
2.3.2. Exploración en costos de producción	82
2.3.2.1 Costo y presupuesto de mezcla convencional.	82
2.3.2.2 Costo y presupuesto de mezclas modificadas.	83
3. Conclusiones	85
4. Recomendaciones	88
Referencias	89
Anexos	94

Índice de figuras

	Pag.
Figura 1. Recolección de material PET	20
Figura 2. Fabricación pellets de plástico PET	21
Figura 3. Muestras fabricadas en laboratorio	25
Figura 4. Desgaste agregado PET	46
Figura 5. Gráfica de desgaste de las muestras	47
Figura 6. Gráfica de viscosidad cinemática	58
Figura 7. Curva granulométrica	60
Figura 8. Consolidación de datos	65
Figura 9. Gravedad específica máxima	67
Figura 10. Porcentaje de vacíos	68
Figura 11. Resistencia a la disgregación	71
Figura 12. Estabilidad y flujo de Marshall	74
Figura 13. Gráfica de permeabilidad	77
Figura 14. Gráfica de compresión simple	80
Figura 15. Briquetas	81
Figura 16. Grafica diferencia de costos de las briquetas	83

Índice de tablas

	Pag.
Tabla 1. Granulometría	23
Tabla 2. Granulometría con porcentajes de reemplazo	24
Tabla 3. Relación factor y número de golpes	28
Tabla 4. Granulometría	35
Tabla 5. Resistencia mínima a la compresión	42
Tabla 6. Masa antes y después del ensayo con su respectivo porcentaje de pérdidas	44
Tabla 7. Desgaste promedio del agregado PET	45
Tabla 8. Humedad de las muestras	48
Tabla 9. Resultados límite líquido	49
Tabla 10. Resultados equivalente de arena	50
Tabla 11. Resultados gravedad específica agregado grueso	52
Tabla 12. Resultados gravedad específica agregado fino	53
Tabla 13. Resultado de ensayos de agregado grueso	54
Tabla 14. Penetración de material bituminoso	55
Tabla 15. Viscosidad cinemática	57
Tabla 16. Cumplimientos del ligante asfáltico	59
Tabla 17. Masa por cada porcentaje de asfalto	61
Tabla 18. Gravedad específica promedio por cada porcentaje	62
Tabla 19. Promedio de gravedad específica de la parafina por cada porcentaje de asfalto	63
Tabla 20. Promedio gravedad específica Bulk	63
Tabla 21. Promedio de densidades	64
Tabla 22. Resultados espécimen	65
Tabla 23. Gravedad específica máxima	66
Tabla 24. Porcentaje de vacíos por cada porcentaje de asfalto	67
Tabla 25. Resistencia a la disgregación en probetas convencionales	69
Tabla 26. Resistencia a la disgregación en muestras modificadas	70
Tabla 27. Porcentaje de diferencia en Resistencia a la disgregación	71

Tabla 28. Estabilidad y flujo Marshall muestra convencional	72
Tabla 29. Estabilidad y flujo de Marshall muestras modificadas	73
Tabla 30. Valores estabilidad y flujo Marshall	73
Tabla 31. Porcentaje de diferencia en estabilidad y flujo de Marshall	75
Tabla 32. Resultados prueba de permeabilidad convencional	76
Tabla 33. Permeabilidad promedio de mezcla modificada	76
Tabla 34. Cumplimiento de permeabilidad	77
Tabla 35. Ensayo compresión simple convencional	78
Tabla 36. Ensayo de compresión simple modificada	78
Tabla 37. Ensayo de compresión simple	79
Tabla 38. Porcentaje de diferencia en compresión simple	80
Tabla 39. Costo briqueta convencional	82
Tabla 40. Costo por briquetas y su diferencia	84

Índice de ecuaciones

	Pag.
Ecuación 1. Porcentaje de pérdidas	26
Ecuación 2. Porcentaje de pérdidas	27
Ecuación 3. Humedad del agregado	28
Ecuación 4. Límite líquido	28
Ecuación 5. Equivalente de arena	29
Ecuación 6. Porcentaje de partículas planas y alargadas	30
Ecuación 7. Gravedad específica agregado grueso	32
Ecuación 8. Gravedad específica agregado fino	32
Ecuación 9. Precisión de operador	33
Ecuación 10. Punto de inflamación	33
Ecuación 11. Índice de penetración	34
Ecuación 12. Factor índice de penetración	34
Ecuación 13. Gravedad específica	36
Ecuación 14. Gravedad específica de la película de parafina	37
Ecuación 15. Gravedad específica Bulk	37
Ecuación 16. Densidad del espécimen	38
Ecuación 17. Regla de tres porcentaje de vacíos	38
Ecuación 18. Gravedad específica máxima	39
Ecuación 19. Volumen de vacíos	39
Ecuación 20. Pérdida por desgaste	41
Ecuación 21. Ejemplo para encontrar la masa de cada porcentaje	61

Índice de anexos

	Pag.
Anexo A. Ensayo de los agregados	95
Anexo B. Ensayos de desgaste	96
Anexo C. Pruebas de ligante asfáltico	102
Anexo D. Desgaste en PET	103
Anexo E. Gravedad específica de los porcentajes de asfalto	104
Anexo F. Gravedad específica de la película de parafina	108
Anexo G. Gravedad específica bulk	113
Anexo H. Densidad	118
Anexo I. Gravedad específica máxima	121
Anexo J. Porcentaje de vacíos	122
Anexo K. Adhesividad mezcla convencional	123
Anexo L. Adhesividad mezcla modificada	124
Anexo M. Permeabilidad mezcla modificada	132
Anexo N. Ensayo de compresión mezcla modificada	134
Anexo O. APU mezcla convencional	139
Anexo P. APU mezcla modificada	141
Anexo Q. Exploración en costos de producción de briqueta convencional y modificada	149

Introducción

La infraestructura vial en Colombia enfrenta desafíos considerables, con el deterioro de vías tanto rurales como urbanas como un problema central según el Diario El Portafolio (2022). Este deterioro, a menudo exacerbado por las inclemencias del clima y la limitada capacidad de los sistemas de drenaje tradicionales, ha generado la necesidad de soluciones innovadoras. En respuesta a esta problemática, se ha llevado a cabo una investigación enfocada en la implementación de una capa de pavimento asfáltico permeable, diseñada específicamente para mejorar el drenaje del agua y prevenir acumulaciones.

El pavimento permeable, con su estructura altamente porosa, permite que el agua se filtre a través del mismo, ofreciendo ventajas significativas sobre el pavimento convencional. Esta solución ha demostrado su eficacia en naciones con importantes actividades manufactureras, con efectos positivos que incluyen la recarga de acuíferos, la captación y utilización del agua de lluvia, así como la mejora de la seguridad vial al evitar áreas propensas a inundaciones o congelamiento. En el marco de esta investigación, se ha desarrollado una mezcla drenante mediante la incorporación de pellets de plástico en PET, tras un proceso meticuloso de recolección y limpieza; estos pellets se han integrado en la composición del asfalto en proporciones adecuadas, generando un impacto medio ambiental a gran escala, teniendo en cuenta que la recolección y el reciclaje de plástico PET.

Lo anterior, permitió utilizar alrededor de 46 botellas pequeñas de 245 ml y a su vez, es posible afirmar que se utilizaron aproximadamente 26 botellas grandes de 500 ml que dieron origen a una placa de plástico fundido de alrededor de 3 cm de alto, 25 cm de largo y 10 cm de ancho, dando lugar a un material granular para la fabricación de muestras. Estas muestras, con diferentes concentraciones de plástico PET, permitieron la realización de varios ensayos y comparaciones con el pavimento convencional, como, por ejemplo, que en el reemplazo del 30% del material plástico, la infiltración tuvo una disminución en el tiempo de paso del agua del 30% a comparación de la mezcla drenante convencional, favoreciendo el reciclaje y evitando la degradación ambiental asociada con la acumulación de residuos plásticos.

1. Resumen

En Colombia, se han enfrentado desafíos significativos debido al deterioro de vías tanto rurales como urbanas según el Diario El Portafolio (2022), ocasionado por las inclemencias del clima y la insuficiente capacidad de los sistemas de drenaje convencionales. Como respuesta a esta problemática, se emprendió una investigación orientada a la implementación de una capa de pavimento asfáltico permeable, diseñada específicamente para facilitar el drenaje del agua y prevenir acumulaciones. Este tipo de pavimento, caracterizado por su elevada porosidad, permite que el agua se filtre a través de su estructura, en contraposición al pavimento convencional. La adopción de este pavimento innovador ha demostrado ser beneficiosa en naciones con una importante actividad manufacturera.

Entre los efectos positivos se cuentan la recarga de acuíferos, la captación y aprovechamiento del agua de lluvia, así como el fortalecimiento de la seguridad vial al evitar áreas propensas a inundaciones o congelamiento. En el marco de este estudio, se diseñó una mezcla drenante mediante la incorporación de pellets de plástico PET, utilizando un proceso de ajuste meticuloso para adaptar el material a las exigencias específicas. Tras someter el plástico a un riguroso proceso de recolección y limpieza, se incorporó en la composición del asfalto en porcentajes apropiados. Posteriormente, se obtuvo un material granular para la fabricación de muestras, cada una con diferentes proporciones de plástico PET, teniendo en cuenta que la recolección y el reciclaje de plástico PET, permitieron utilizar alrededor de 46 botellas pequeñas de 245 ml y a su vez, es posible afirmar que se utilizaron aproximadamente 26 botellas grandes de 500 ml que dieron origen a una placa de plástico fundido de alrededor de 3 cm de alto, 25 cm de largo y 10 cm de ancho, dando lugar a un material granular para la fabricación de muestras.

Estas muestras, con diferentes concentraciones de plástico PET, permitieron la realización de varios ensayos y comparaciones con el pavimento convencional, como, por ejemplo, que en el reemplazo del 30% del material plástico, la infiltración tuvo una disminución en el tiempo de paso del agua del 30% a comparación de la mezcla drenante convencional, favoreciendo el reciclaje y evitando la degradación ambiental asociada con la acumulación de residuos plásticos.

1.1. Formulación del problema

Al diseñar un pavimento drenante, ¿cómo puede incorporarse el plástico PET a la capa de rodadura para reducir la contaminación por plásticos y mejorar la sostenibilidad medioambiental de la construcción de carreteras?

1.2 Justificación

En esta investigación, se pretende reducir la explotación de materiales que dañan los ecosistemas, proponiendo diseños de concreto asfáltico drenante como alternativa para pavimentos. Estos diseños deben cumplir con estándares de resistencia y elasticidad mejores a los establecidos por las especificaciones de construcción de carreteras del INVIAS para el año 2022. Se plantea también la utilización de plásticos PET en la capa de rodadura para complementar la grava convencional, con el fin de disminuir la contaminación con plástico y fomentar su reutilización. Según un estudio realizado en 2018, las ventas de plástico en Colombia aumentaron un 2,5%, con una producción anual de 60.000 toneladas de bolsas plásticas, 2.000 toneladas de pitillos y 23.000 toneladas de tapas de botellas plásticas.

Además, se propone incluir una losa de concreto debajo de la capa de rodadura para proteger los materiales de la base y subbase del deterioro causado por la infiltración del agua. En ingeniería civil, las soluciones convencionales, como zanjas y accesorios de drenaje, suelen añadir carga al alcantarillado público. Esto motivó la creación de diversas estructuras de drenaje para mejorar las vías. Sin embargo, en muchos casos, estas soluciones resultan insuficientes debido a problemas de diseño, estancamiento o el impacto del cambio climático. Por tanto, se busca implementar nuevas tecnologías como el pavimento drenante, que tiene la capacidad de drenar agua y filtrar aire a lo largo de toda la superficie pavimentada. Este tipo de pavimento puede reducir la carga sobre los desagües, ya que acorta el tiempo de evacuación hacia los canales correspondientes. Además, se promueve un uso óptimo de plásticos en la producción y reemplazo de materiales pétreos, favoreciendo el reciclaje y evitando la degradación del plástico en materiales contaminantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento físico y mecánico de una mezcla asfáltica drenante con adiciones de pellets de plástico en una carpeta de rodadura.

1.3.2 Objetivos específicos

Diseñar una mezcla drenante para una carpeta de rodadura de pavimento asfáltico con adiciones de pellets de plástico PET previamente fabricadas.

Determinar el comportamiento físico y mecánico de probetas de mezcla drenante adicionada con pellets de acuerdo con la normativa vigente.

Analizar económicamente los resultados obtenidos de mezclas drenantes adicionadas con pellets en una carpeta de rodadura a comparación de mezclas convencionales.

1.4. Antecedentes

1.4.1 Antecedentes internacionales

Según Cruz (2019), en los últimos años ha presentado diversos problemas a la falta de drenaje de las aguas pluviales en Perú, se trata de un crecimiento poblacional, debido a que la zona urbanizada, cada vez más extensa, produce una necesidad de más infraestructura y principalmente aceras para una buena movilización. En la actualidad se necesitan construcciones innovadoras para los problemas ocasionados por las fuertes lluvias o las captaciones de agua existentes; el hormigón permeable es un hormigón especial que deja pasar el agua a través de su estructura gracias a los grandes vacíos presentes, a diferencia del hormigón tradicional. Esta cualidad contribuye a la falta de permeabilidad de las estructuras de hormigón, evitando fallas estructurales por colmatación de escorrentías. Esta investigación se centró en el diseño de once concretos permeables, entre los

cuales se eligió uno de ellos para ser aplicado como solución alternativa para los rígidos. Este diseño asegura una resistencia a compresión de 280 kg/cm^2 y un módulo de rotura de 42 kg/cm^2 . El innovador hormigón puede filtrar hasta $60 \text{ litros/m}^2/\text{min}$. Para validar estas tres características principales del concreto permeable, se tomaron muestras de un prototipo construido en sus laboratorios.

Según Castellet (2022) el análisis de la capacidad de reducción del riesgo de inundación en zona urbana se reduce mediante el uso de pavimentos drenantes. El daño por inundaciones por tormentas está aumentando debido al aumento de la impermeabilidad de la cuenca, los sistemas de drenaje urbano sostenible son soluciones a una variedad de problemas de drenaje urbano, aunque ocasionalmente se utilizan como complemento del drenaje tradicional; el presente estudio evalúa la capacidad de reducir las inundaciones pluviales mediante la aplicación de pavimentos drenantes en vías ciclísticas de Barcelona, teniendo en cuenta escenarios actuales y futuros que contemplan horizontes de cambio el sellado del urbanismo cuencas.

1.4.2 Antecedentes nacionales

Como se muestra en los aportes de López y Asprilla (2013), el desarrollo vial requiere la construcción de pavimentos capaces de resistir adecuadamente las fuerzas transmitidas por las cargas repetidas durante el período en que se realizó la obra. Sin embargo, estos pavimentos tradicionales provocan un importante sellado urbano, lo que aumenta los riesgos de inundación y retraso a largo plazo de los cuerpos de agua receptores. Una de las técnicas alternativas más utilizadas corresponde a las porosas, que permiten la percolación del agua a través de la estructura, lo que retrasa la escorrentía generada por el tiempo lluvioso, para luego restaurar el volumen de agua. agua en un entorno natural o además de y/o sistemas de drenaje convencionales; el objetivo de este trabajo fue lograr un estado del arte sobre pavimentos porosos y permeables utilizados como alternativas al drenaje urbano, particularmente en términos de métodos de diseño, construcción y mantenimiento en Bogotá.

Se encontraron siete métodos de diseño hidrológico, de los cuales se basan en curvas IDF y dos en series de precipitación. Además, los métodos encontrados se basan en la atenuación de caudales

máximos, con el objetivo de evitar o mitigar inundaciones, pero ningún método de diseño específico fue para el aprovechamiento del agua de lluvia. Por otro lado, según la revisión bibliográfica realizada, uno de los factores más importantes que determina el funcionamiento del poroso es el taponamiento.

En la investigación de Rodríguez y Castañeda (2018) titulada “Variación de la permeabilidad de pavimentos drenantes, elaborados con gravas de TMN 1" y 1/2"; se habla sobre cómo en la ciudad de Girardot, la intensidad de la lluvia demostrada por el IDEAM es bastante significativa, esto hace que se presenten inundaciones en las vías urbanas, por lo que los pavimentos drenantes son considerados como una vía sustentable como la solución. Carolina Hernández, tutora de este proyecto de diploma, aplica la metodología experimental, en donde se preparan nueve muestras de concreto con diferentes gravas de tamaño nominal máximo de 1 pulgada y ½ pulgada comercializadas en el Alto Magdalena y se diseñan equipos didácticos para la permeabilidad de las nueve muestras.

Demostrando que la permeabilidad de hormigones permeables elaborados con agregados de tamaño nominal máximo de una pulgada varía con respecto a la porosidad de forma logarítmica creciente, es decir que cuanto mayor es, mayor es la permeabilidad de la muestra alto. Al medir la variación en la porosidad de las muestras su graduación, se enmarca en que las muestras de gradación gruesa registran mayor porosidad mayor permeabilidad que en la gradación fina. Encuentran que, para este caso particular, la permeabilidad del material grueso menor que la del material fino, se supone que ocurre porque sus caras y espacios de fractura han sido rellenados con pasta, por lo que el drenaje ha disminuido, resultando en una apariencia diferente.

1.4.3 Antecedentes regionales

En el estudio titulado “Mezcla en concreto con estructura drenante fabricado con agregados de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales”, según Ortega (2015); se dice que a menudo, el impacto ambiental está asociado con el desarrollo y las áreas urbanas que causen un efecto negativo, entre el sellado del suelo. Este efecto promueve la escasez de agua, alterando lo natural al interrumpir la infiltración en el subsuelo y agotando los acuíferos al no permitirles el paso. Por

otra parte, las molestias que generan los escurrimientos por lluvias sobre pavimentos impermeables solo provocan numerosos vertimientos en los cursos de agua, presentando una fina película de agua que provoca el fenómeno de hidropneumático tras una mala adherencia neumático-carretera y también una desestabilización de la seguridad y funcionalidad de la carretera.

Ahora bien, según Camargo (2019) expone el estudio titulado “Mejoramiento de mezclas asfálticas porosas mediante la incorporación de fibras de nylon y polipropileno”, se analizó el impacto de la adición de estas fibras en las propiedades de las mezclas asfálticas porosas. Se llevaron a cabo ensayos del Cantábrico en condiciones secas y húmedas como parte del desarrollo del proyecto; se propuso la fabricación de todas las briquetas bajo un diseño de mezcla asfáltica específico, variando la dosificación de betún en 4.4%, 4.8% y 5.2% del peso total. A través de los ensayos del Cantábrico, se determinó que las fibras en las mezclas asfálticas porosas mejoraron la resistencia a la abrasión y al desgaste. Al evaluar el peso de las partículas perdidas en las briquetas con fibras añadidas en comparación con las que no tenían fibras, se observó una clara mejora en las propiedades de las mezclas.

1.5. Metodología

En este proyecto, se definió la metodología como un conjunto organizado de procedimientos, técnicas, herramientas y pasos precisos empleados para ejecutar las actividades específicas orientadas a alcanzar los objetivos establecidos. Es crucial destacar que la implementación de esta metodología se basó en el artículo 453 de 2022, según el Instituto Nacional de Vías-INVIAS (2022). El artículo implica la elaboración, transporte, colocación y compactación de una capa de mezcla asfáltica de tipo drenante, preparada y colocada en caliente, de acuerdo con las especificaciones detalladas y los lineamientos establecidos.

1.5.1. Diseñar mezcla drenante para una carpeta de rodadura de pavimento asfáltico adiciones de pellets de plástico PET (Tereftalato de Polietileno)

1.5.1.1. Creación de pellets a partir de plástico PET. Existe una forma sencilla de reciclar las botellas de plástico PET convirtiéndolas en bloques de plástico PET, estos bloques de plástico tienen multitud de posibilidades, y permiten reutilizar las botellas para crear nuevos objetos, ya que lo que se extrae de ellas es la materia prima. Para que este se diera de manera exitosa inicialmente se realizaron los siguientes pasos:

Recolección de material. Para la recolección del material, se tiene en cuenta la solicitud de apoyo de las persona de la comunidad pastusa y familiares que ayudaron con el reciclaje de este tipo de botellas por todos los sectores públicos de Pasto, Nariño, que permitirán la obtención de botellas plásticas, con el fin de reutilizar el material y que sea adecuadamente implementado en la carpeta asfáltica que se pretende realizar, teniendo en cuenta que esta recolección sea separada en bolsas de tal forma que se facilite su obtención, como se muestra en la figura 1.

Figura 1.

Recolección de material PET



Limpieza de plástico PET. Para esta limpieza del plástico, es necesario reducir las botellas, para que logre ser más fácil dicha limpieza, en primer lugar se tiene en cuenta que es necesario vaciar el contenido restante que estas botellas presentaban y de tal forma, poder quitar las tapas y la etiqueta correspondiente, a su vez se clasificó en distintas bolsas por botellas grandes y por botellas pequeñas, para poder formar tiras de plástico que permitan generar pequeñas partículas como cristales aproximadamente de un centímetro de pellets y separarlos en recipientes para lavarlos con agua, con el fin de que no se presenten cambios en las propiedades físicas y químicas del material PET.

Corte de plástico. Para la construcción de los pellets de plástico PET, como se menciona anteriormente, es necesario llevar a cabo el corte del material recolectado, teniendo en cuenta que este proceso se ha realizado a mano y con tijeras, con el fin de que se haga de forma eficaz y evitando el desperdicio de material.

Forma y tamaño. Para darle forma al plástico PET, primero se calienta el horno de mufla utilizado para fundir el plástico PET y otros materiales. Se tarda dos horas ± 1 en precalentar el horno a $\pm 305^{\circ}\text{C}$, ligeramente por encima del punto de fusión de la resina de PET, para acelerar el proceso y reducir las emisiones, como se muestra en la figura 2. Durante el proceso de precalentamiento, se preparan dos moldes que se lubrican con grasa de automoción. El plástico

PET cortado se coloca en los moldes por capas, evitando golpear la pared inferior con un mazo de goma. Cada molde contiene aproximadamente 900 gramos de plástico PET, que se reducen a 700 gramos al final del proceso. A esta temperatura, el plástico se funde y se le da forma en el molde. Todo el proceso dura aproximadamente 1 hora y 30 minutos. Los moldes se retiran del horno de mufla y la última capa de material se mezcla para volver a formar una masa homogénea. Tras enfriarse durante 15 minutos, el bloque se desmolda. El bloque de plástico se tritura en trozos del tamaño de $\frac{3}{8}$ y la chatarra se funde en el molde para su reutilización.

Figura 2.

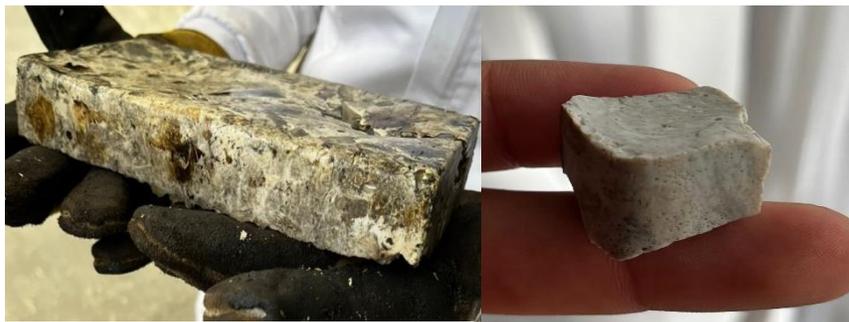
Fabricación pellets de plástico PET

(a) Plástico triturado, (b) Vista interna del bloque creado con plástico PET, (c) Bloque completo creado con plástico PET, (d) Agregado de plástico PET.



(a)

(b)



(c)

(d)

1.5.1.2. Tamaño de partículas y pellets. En primer lugar, hay que determinar el tipo de material necesario para el muestreo de laboratorio a fin de garantizar que el pavimento asfáltico sea adecuado para el desgaste por drenaje. Para ello, se debe realizar un análisis granulométrico para determinar el tamaño de la piedra triturada necesaria para la mezcla. Se utiliza el porcentaje total de piedra triturada retenida en el tamiz y se sustituye parcialmente por partículas acabadas con un porcentaje menor de finos. Este método se utiliza principalmente para analizar la granulometría del material utilizado como árido. Los resultados pueden utilizarse para comprobar el cumplimiento de las especificaciones granulométricas y para controlar la producción de áridos y mezclas que los contengan.

1.5.2. Porcentajes de partículas y pellets

Para determinar el porcentaje de la cantidad de pellets es necesario llevar a cabo un estudio que determine qué tanto por ciento se quiere reemplazar del agregado grueso, para esto es necesario realizar un estudio de las propiedades de este agregado (pellets), determinando que falta por sustituir de pellets en ciertos porcentajes en el agregado grueso, tales porcentajes son desde el punto máximo en un 70% de pellets, dejando el 30% de agregado grueso, en el punto medio se utilizará un 50% de pellets y el otro 50% de agregado grueso, un 30% y un 20% de pellets y un punto mínimo de 10% de pellets con 90% de agregado grueso, teniendo en cuenta que el reemplazo se va a realizar en el tamiz de $\frac{3}{8}$ ".

1.5.3. División porcentaje de pellets de plástico PET

Para la realización de este proyecto, es necesario dividir en porcentajes previamente seleccionados, reemplazando el agregado grueso normalmente utilizado con pellets de plástico, a fin de producir diferentes briquetas por los porcentajes deseados, en los cuales se estipula realizar 3 briquetas por cada porcentaje, los cuales son del 70%, 50%, 30%, 20% y 10%. Con el fin de encontrar el mejor sustituto para realizar un pavimento drenante con buena relación de resistencia y porosidad. Para esta adición de porcentajes, inicialmente se realiza la granulometría de la tabla 1.

Tabla 1.*Granulometría*

Tamiz	Tamiz (mm)	Lim inferior	Límite superior	Porcentaje pasante	Retenido acumulado	Retenido parcial	Peso ret. parcial (g)
3/4	19	100	100	100	0	0	0,0
1/2	12,5	70	100	85	15	15	180,0
3/8	9,5	50	75	65	35	20	240,0
N°4	4,75	15	32	25	75	40	480,0
N°10	2	9	20	17	83	8	96,0
N°40	0,425	5	12	8	92	9	108,0
N°200	0,075	3	7	5	95	3	36,0
Fondo	Fondo			0	100	5	60,0

Ya con estos datos obtenidos se puede realizar el cambio en los porcentajes de cada briqueta haciendo la siguiente relación mediante regla de tres:

$$100\% \rightarrow 240g$$

$$70\% \rightarrow X$$

$$X = 168g \text{ de pellets de plástico PET}$$

$$X = 240g - 168g$$

$$X = 72 g \text{ de grava}$$

Esto quiere decir que, para una masa inicial de grava de 240 g, se reemplazan 168 g con plástico PET y se utilizan 72 g de grava, generando así la reducción de este material pétreo.

Así mismo, se realiza para todos los porcentajes mencionados anteriormente y se logra encontrar lo mencionado gracias a la consignación de los datos en la tabla 2.

Tabla 2.*Granulometría con porcentajes de reemplazo*

Tamiz (mm)	Tamiz (mm)	Peso ret parcial (g)	70%	50%	30%	20%	10%
3/4	19	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2	12,5	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
3/8	9,5	240,0	168	120	72	48	24
3/8	9,5	240,0	72,0	120,0	168,0	192,0	216,0
N°4	4,75	480,0	480,0	480,0	480,0	480,0	480,0
N°10	2	96,0	96,0	96,0	96,0	96,0	96,0
N°40	0,425	108,0	108,0	108,0	108,0	108,0	108,0
N°200	0,075	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0
Fondo	Fondo	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
TOTAL		1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Nota. La franja que se encuentra marcada, corresponde al tamiz que será reemplazado.

Es posible ordenar los datos en donde se observa la granulometría, con su peso inicial retenido en el tamiz de $\frac{3}{8}$ ", su respectivo porcentaje y peso que va a ser utilizado a cambio de la grava en las 3 briquetas modificadas, que van a ser realizadas para cada porcentaje y se obtiene que para realizar 30 briquetas se necesitan 2592 g de pellets de plástico PET, es decir que se utilizarán alrededor de 3 moldes de pellets mencionados anteriormente, es decir que se fundirán alrededor de 10 moldes recuperando el material para nuevas fundiciones.

1.5.4 Fabricación de las muestras INV-E 760

Se determinan 4 porcentajes de asfalto para determinar el porcentaje óptimo en construcción de briquetas con mezcla modificada para esto cada probeta como se mencionó anteriormente tiene una masa de 1200 g, la cual se fabricó cumpliendo con los parámetros especificados en la norma. Se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje, para su elaboración se precalienta la cantidad de material necesario para las probetas hasta alcanzar la temperatura de fabricación (170 °C), se

mezcló hasta obtener una consistencia homogénea en un tiempo menor a 60 segundos por cada briqueta, posteriormente se vertió la mezcla en el molde el cual se encontraba a una temperatura de 90 °C a 160 °C con su respectivo collar; estos instrumentos son engrasados para evitar la adherencia del material. Posteriormente, al vertimiento se verificó que la mezcla se encuentre a temperatura de compactación (160 °C). Por último, se procede a colocar el conjunto en el ensamble para compactación de Marshall en donde se aplicaron 50 golpes a cada uno de los extremos, pasadas las 24 horas se realiza el retiro del molde como se evidencia en la figura 3 (muestras fabricadas).

Figura 3.

Muestras fabricadas en laboratorio



1.5.4.1 Ensayo de desgaste INV E-218. De acuerdo con lo establecido en la norma, se determinó el porcentaje de desgaste de agregados gruesos, para el tamizado se aplica la gradación A debido al tamaño nominal del agregado grueso (1”), previamente se tamizan 1250 g por cada tamiz como se establece en el artículo 453 de 2022 hasta obtener una masa total de 5000 g, seguido de esto se aplica el método de cuarteo para una cantidad de muestra representativa, la cual fue seguidamente lavada y secada durante un tiempo de 12 a 16 horas hasta obtener una masa constante; debido a esto, se utiliza la máquina de los ángeles, con tres muestras de el mismo agregado, durante 500 rpm propuestas en la norma y utilizando las 12 esferas propuestas para la gradación, se procede a hacer la limpieza con el tamiz número 12 con el fin de determinar que la muestra sea adecuada para el diseño de la mezcla asfáltica drenante, esto se evidencia en la ecuación 1.

Ecuación 1.

Porcentaje de pérdidas

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

En donde, **P1**: Masa de la muestra seca antes del ensayo (g), **P2**: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo sobre tamiz de 1.70 mm (No. 12), (g).

1.5.4.2 Ensayo de desgaste INV E-218 para PET. Inicialmente se prepara la muestra en este caso el agregado de plástico PET estableciendo un porcentaje de desgaste del agregado de plástico PET, para el tamizado se aplica la graduación A, en donde anticipadamente se tamizan 2500 g por cada tamiz como se establece en el artículo 453 de 2022 hasta obtener una masa total de 7500 g; seguido de esto se aplica el método de cuarteo para una cantidad de muestra representativa, la cual se dejó reposar entre 12 y 16 horas para obtener una masa constante; se utilizó la máquina de los ángeles, con las tres muestras anteriormente preparadas, durante 500 rpm propuestas en la norma y utilizando 6 esferas propuestas para la gradación, una vez realizado el desgaste se procede a realizar la limpieza del material con el tamiz número 12 con el fin de determinar que la muestra sea adecuada para el diseño de la mezcla asfáltica drenante, en donde se establecen dos masas de la muestra como en la ecuación 2, para obtener el porcentaje de pérdida.

Ecuación 2.

Porcentaje de pérdidas

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

En donde, **P1:** Masa de la muestra seca antes del ensayo (g), **P2:** Masa de la muestra seca después del ensayo, previo sobre tamiz de 1.70 mm (No. 12), (g).

1.5.4.3 Impurezas del agregado grueso INV E-237. En este procedimiento se cuenta con un método de limpieza para el agregado grueso, en este caso la grava, en el cual por lavado se separan las partículas, al tratarse de una muestra de laboratorio y briquetas preparadas para el ensayo experimental, este nivel de impurezas se debe máximo 0.5 % es por esto por lo que se establece un nivel de limpieza alto y remoción de materiales adheridos al agregado grueso. Sin embargo, se establece la humedad del material como se menciona en la norma, utilizando 3 para establecer la humedad con ayuda de la ecuación 3.

Ecuación 3.

Humedad del agregado

$$w = \frac{Mh - Ms}{Ms}$$

Donde, **Mh**: masa húmeda en g, **Ms**: masa seca en g

1.5.4.4 Índice de plasticidad INV E-125 y INV E-126. El objetivo del ensayo es determinar el porcentaje de arcilla presente en la arena a utilizar, en este caso para conocer si hay presencia de este material se realizó el límite líquido descrito en la norma INV E-125 utilizando la cazuela de casagrande, para encontrar el valor del límite líquido mediante la ecuación 4.

Ecuación 4.

Límite líquido

$$LL = K * Wn$$

Donde, **LLN**: Límite líquido a partir de un punto, para un tanteo, %, **N**: Número de golpes para que se cierre la ranura en un tanteo, **Wn**: Contenido de agua para un tanteo, **K**: Factor de corrección (tabla 3).

Tabla 3.

Relación factor y número de golpes

Número de golpes (N)	Factor para límite líquido (K)
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990

24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Nota. La tabla 3 corresponde a la Tabla 125 - 1 de la norma INV E-125 de 2013.

1.5.4.5 Equivalente de arena INV E-133. Para conocer el equivalente de arena se calcula la cantidad de agregado fino (arena) y se analiza para obtener datos sobre el contenido de arcilla de la muestra. La muestra de agregado fino se divide en tres porciones de 85 ml en un recipiente metálico. Se vierte la solución original en el recipiente y se realiza un procedimiento similar con tres muestras diferentes. Utilizando un embudo, se vierte la muestra en el recipiente y se liberan las burbujas de aire para asegurarse de que la muestra está completamente saturada. Se deja cada muestra durante 10 minutos. Transcurridos los 10 minutos, se tapa el recipiente y se agita para aflojar el material del fondo.

A continuación, se agita mecánicamente el recipiente durante 45 ± 1 segundos. Inmediatamente después de la agitación, se coloca el recipiente en posición vertical, se retira la tapa, se introduce un tubo de riego en el recipiente y se lava el material que cuelga de las paredes del recipiente; a continuación, se aplica presión y rotación hasta que el material quede en la marca. Se deja reposar el material durante $20 \text{ minutos} \pm 15 \text{ segundos}$, se lee el nivel en la parte superior del lodo arcilloso, para registrar el nivel de arena se introduce el disco, la varilla y el equipo de pesaje en el recipiente y se bajan lentamente en la arena, este equivalente se puede cuantificar gracias a la ecuación 5.

Ecuación 5.

Equivalente de arena

$$EA = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} * 100$$

1.5.4.6 Partículas planas y alargadas INV E-230. La forma granulométrica del agregado grueso se determina porque en el proceso de construcción de la mezcla estos aspectos afectan la colocación, la compactación y el comportamiento durante la operación. Para esto se extrae una cantidad de agregado grueso, en donde se lava y se seca en horno para eliminar la arena, se tomó una muestra de 5 kg por el método del cuarzo, tal como se especifica en la norma. Antes de realizar el ensayo, la muestra debe tamizarse con un tamiz adecuado; en este caso se selecciona un tamiz con un tamaño de malla de 1 ½ a 1/4 de malla, y pueden utilizarse los métodos A y B para realizar el ensayo.

El método A consiste en el tamizado de las partículas planas y alargadas por el uso, donde las partículas planas son las que pasan por la abertura máxima del tamiz, y las alargadas son las retenidas por el tamiz de 63 mm (2 ½") y el material que pasa por el tamiz de 6,3 mm (¼"), respectivamente; el método B consiste en el tamizado de las partículas planas y alargadas por el uso, donde las partículas planas son las que pasan por la abertura máxima del tamiz y las alargadas son las retenidas por el tamiz de 63 mm (2 ½") y el material que pasa por el tamiz de 6,3 mm (¼"). Se establece entonces que el porcentaje de caras planas y alargadas será del 10% ya que así se indica la ecuación 6.

Ecuación 6.

Porcentaje de partículas planas y alargadas

$$I = \frac{m_i}{R_i} * 100$$

Donde, **R_i**: es la masa de la fracción d/D; en g, **m_i**: es la masa de las partículas planas o largas, según el índice que se desee calcular, de la fracción d;/D_i, en g.

1.5.4.7 Ensayo de caras fracturadas INV E-227. Se determinó el porcentaje de masa de nuestra muestra de agregado pétreo compuesta por partículas fracturadas; inicialmente se lavó y se secó una cantidad de muestra de agregado grueso para remover residuos de material fino, se realizó un cuarteo del material para obtener un tamaño de muestra óptimo para el ensayo, de acuerdo con lo mencionado, la masa mínima de material es 3000 gramos que se escogió según el tamaño máximo nominal de la muestra, en este caso el T.M.N de 1 ".

1.5.4.8 Ensayo de caras fracturadas INV E-227 para PET. Se determinó el porcentaje de masa de la muestra de agregado de plástico PET compuesta por partículas con caras fracturadas, ya que inicialmente se realizaron bloques del agregado, para esta elaboración se creó un molde para agregar el plástico PET; el cual fue expuesto a una temperatura de 300° para alcanzar su punto plástico formando bloques de este agregado, posteriormente se deja reposar por \pm 15 minutos a fin de realizar el cuarteo de estos bloques dando como resultado un tamaño óptimo para el ensayo, de acuerdo con lo mencionado, la masa mínima de material es de 3000 gramos del tamiz que se quiere reemplazar.

1.5.4.9 Gravedad específica de agregado grueso INV-E 223. Para definir la gravedad específica y absorción del agregado grueso se deben indicar los datos necesarios para la obtención del peso específico y la absorción del agregado grueso. Para realizar este proceso, es necesario tener en cuenta que se comienza mezclando completamente los agregados, de tal forma que queden aparentemente de forma uniforme, se procede a realizar cuarteo a conforme se indica en la norma INV E-223, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo. Se debe eliminar el material inferior a 4.75 mm (No. 4) mediante tamizado en seco y lavado para remover los finos adheridos a su superficie, ya que el tamaño máximo nominal de la muestra es de 1" se necesitarán 4 kg de muestra, como se menciona es necesario obtener la masa de la muestra en seco, en sumersión y cuando se encuentra superficialmente seca, inicialmente se calcula la gravedad específica seca al horno por medio de la ecuación 7.

Ecuación 7.

Gravedad específica agregado grueso

$$Sh = \frac{A}{B - C}$$

Donde, **Sh**: Densidad relativa, **A**: Masa al aire de la muestra seca al horno, (g), **B**: Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca, (g), **C**: Masa aparente de la muestra saturada en agua, (g).

1.5.4.10 Gravedad específica de agregado fino INV-E 222. Para encontrar la gravedad específica del agregado fino, se debe establecer procedimiento gravimétrico en la cual se realiza la prueba del cono para verificar la condición saturada y superficialmente seca, para 500 gramos de muestra, luego de esto el picnómetro es llenado previamente con la muestra, se agita de forma manual el picnómetro para sacar aire de la muestra, se mide la temperatura, en donde se mide la masa del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, una vez se obtienen estos datos se procede a meter la muestra en horno y tomar la masa de la muestra seca, para describir el modelo matemático que permite hallar esta densidad se obtienen a partir de la ecuación 8.

Ecuación 8.

Gravedad específica agregado fino

$$Sh = \frac{A}{(B + S - C)}$$

Donde, **Sh**: Densidad relativa, **A**: Masa al aire de la muestra seca al horno, (g), **B**: Masa del picnómetro aforado lleno de agua, (g), **C**: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua, (g), **S**: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca, (g).

1.5.4.11 Penetración de materiales bituminosos INV E-706. Se tiene en cuenta que dentro de la norma colombiana se evalúa y analiza un material bituminoso tipo CA 60-70, en donde inicialmente se vertió la muestra para distintos recipientes, en este caso se analizaron 3 muestras, las cuales se dejaron enfriar a la temperatura entre 15° a 30°C durante un periodo de 1 hora y media; una vez terminado el tiempo de enfriamiento se colocaron las muestras en un baño de agua a una temperatura de 25°C, durante un periodo de 1 hora y media nuevamente. Posteriormente se realizó la penetración con el penetrómetro, gracias a la ecuación 9 se obtiene la precisión del operador.

Ecuación 9.

Precisión de operador

$$a = 0.8 + 0.03(X - 60)$$

Donde, **a**: Precisión para un operador a 25°C.

1.5.4.12 Punto de inflamación y combustión INV E-709. Se establecen los puntos de inflamación y de combustión del material bituminoso utilizando la copa Cleveland manual. Inicialmente se vierte el material bituminoso en la copa Cleveland, teniendo en cuenta que la muestra quede a nivel con la marca de llenado de la copa, seguidamente se enciende el equipo del ensayo hasta lograr la temperatura en la cual es inflamable el material bituminoso para conocer este punto de inflamación se debe conocer la presión barométrica del ambiente y obtener este de la ecuación 10.

Ecuación 10.

Punto de inflamación

$$\text{Punto de inflamación} = c + 0.25(101.3 - k)$$

Donde, **c**: Punto de inflamación observado (°C), **K**: Presión barométrica del ambiente (kPa).

1.5.4.13 Punto de ablandamiento INV E-712. Para este caso, se tiene en cuenta que las temperaturas medidas, tuvieron un valor que se define para el punto de ablandamiento del asfalto en agua destilada entre los valores de 30 a 80 °C, por lo cual se realiza el proceso mediante la aplicación del equipo de anillo y bola, para este ensayo es necesario que el anillo no toque el Erlenmeyer ya que se puede producir una alteración y su resultado proviene de la temperatura a la cual las esferas penetran el anillo de asfalto.

1.5.4.14 Viscosímetro rotacional INV E-717. Se determina la temperatura de fabricación y compactación la cual debe estar la mezcla aplicando el “Principio de Viscosidad”. El ensayo se realizó en el viscosímetro mezcla asfáltica drenante con polímero 71, configurando a 4 temperaturas diferentes, obteniéndose una temperatura de mezclado de 170 °C y de compactación es de 160 °C.

1.5.4.15 Índice de Penetración en los cementos asfálticos I.N.V E – 724/213. Para el caso del índice de penetración, se tiene en cuenta que su magnitud se determina a partir de los resultados de los ensayos de penetración (norma I.N.V E – 706/213) y del punto de ablandamiento con anillo y bola (norma I.N.V E – 712). En donde se aplican las ecuaciones 11 y 12.

Ecuación 11.

Índice de penetración

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

El valor de f se obtiene de la siguiente forma:

Ecuación 12.

Factor índice de penetración

$$f = \frac{50 * \log\left(\frac{800}{P}\right)}{TAB - 25}$$

Donde, **P**: Penetración en 0.1 mm a 25 °C, **TAB**: Punto de ablandamiento °C.

1.5.4.16 Diseño de experimento. En primer lugar, se llevará a cabo una serie de pruebas respectivas a los porcentajes ya estipulados anteriormente, para esto se procede crear cilindros con los porcentajes de 70%, 50%, 30%, 20% y 10% para esto se realizará un promedio y el respectivo estudio de cada porcentaje haciendo así 3 muestras para cada porcentaje en diferentes capas de rodadura obteniendo un total de 36 muestras, esto se realizará a lo largo del proyecto, teniendo en cuenta los ensayos necesarios mencionados más adelante, por otra parte para realizar la comparación de mezcla drenante normal y modificada, además de encontrar el porcentaje de asfalto óptimo para la muestra, se realizan 4 probetas más.

Por otra parte, la granulometría de pavimento drenante que se debe contener en el proyecto es la siguiente, establecida en la tabla 453- 4 así como se visualiza en la tabla 4 del documento.

Tabla 4.

Granulometría

Tipo de mezcla	Tamiz (mm / U.S. Standard)						
	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,075
	3/4 "	1/2 "	3/8 "	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
	Pasa tamiz (%)						
Única	100	70 - 100	50 - 75	15 - 32	9 - 20	5 - 12	3 - 7
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)		4 %			3 %		1 %

Nota. Granulometría otorgada por artículo 453 de 2022

1.5.4.17 Granulometría. Para encontrar el porcentaje de asfalto óptimo se debe realizar el diseño de briquetas por medio de los porcentajes de granulometría combinada que se presentarán a continuación, teniendo en cuenta que la masa total para una biqueta será de 1200 g, esto se realiza según el artículo 453 de 2022, teniendo en cuenta la granulometría de la tabla 1.

1.5.4.18 Gravedad específica Bulk INV-E 734. Para determinar la densidad de cada una de las muestras de mezcla asfáltica, inicialmente se toma la masa de la muestra seca, para después tomar la masa de la muestra en inmersión, en un baño de agua a 25°C durante 4 minutos, posteriormente a esto, se retira la probeta y se deja secar durante 24 horas con el fin de garantizar una masa constante; pasadas las 24 horas, se realiza el baño de dichas probetas en parafina, con el fin de que se sellen sus poros, en donde, nuevamente es tomada la masa de estas briquetas con la parafina correspondiente y son sumergidas de nuevo en agua a 25°C durante 4 minutos, obteniendo una masa.; esto se realiza de la misma forma para las 12 briquetas con los 4 porcentajes de asfalto. Para calcular la gravedad específica Bulk, en primer lugar, se realiza la ecuación 13.

Ecuación 13.

Gravedad específica

$$G_{al} = \frac{A_{al}}{A_{al} - B_{al}}$$

Donde, **Gal:** Gravedad específica de cada espécimen, **Aal:** Masa del espécimen seco en el aire, (g), **Bal:** Masa en el aire del espécimen sumergido en el agua, sin parafina, (g).

Posteriormente a esto, se tiene en cuenta el valor obtenido, con el fin de encontrar la gravedad específica que tiene la parafina, en el caso de cada biqueta y esto se realiza de acuerdo con la ecuación 14.

Ecuación 14.

Gravedad específica de la película de parafina

$$F = \frac{Dal - Aal}{Dal - Eal - \frac{Aal}{Gal}}$$

Donde, **Gal:** Gravedad específica de cada espécimen, **F:** Gravedad específica de la película de parafina, (g), **Dal:** Masa seca del cilindro en parafina, (g), **Eal:** Masa del cilindro con parafina y sumergido en agua, (g), **Aal:** Masa del espécimen seco en el aire, (g).

Una vez obtenido este promedio, se utiliza de la misma forma el promedio de gravedad específica, para cada uno de los porcentajes de muestras, en los cuales se determina la gravedad específica Bulk, con el fin de determinar el porcentaje de asfalto óptimo, lo cual se realiza mediante la ecuación 15 y 16.

Ecuación 15.

Gravedad específica Bulk

$$Geb = \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{F}}$$

Donde, **Geb:** Gravedad específica bulk, **A:** Masa del espécimen seco al aire, **D:** Masa en el aire del espécimen, con parafina, **E:** Masa del espécimen con parafina sumergida en agua, **F:** Gravedad específica de la película de parafina.

Por otra parte fue necesario establecer la densidad de cada espécimen.

Ecuación 16.

Densidad del espécimen

$$D = Geb * Y$$

Donde, **D**: Densidad del espécimen, **Geb**: gravedad específica bulk, **Y**: 0.9970 corresponde a un factor de corrección en g/cm^3 .

1.5.4.19 Vacíos de aire en la mezcla INV-E 736. Esta norma se realiza con el fin de determinar el porcentaje de vacíos ocupados por el aire en las mezclas asfálticas densas y abiertas compactadas, en este caso es de manera imprescindible el verificar cuál de los porcentajes de asfalto cumple de manera más certera el ser el máximo porcentaje de vacíos, para que este sea un pavimento drenante. Al mencionar estos dos tipos de mezcla se tiene en cuenta que la mezcla asfáltica densa, es una mezcla asfáltica en la cual, una vez compactada, los vacíos con aire son menores de 10 % y que la mezcla asfáltica abierta, es una mezcla asfáltica en la cual los vacíos con aire son iguales o mayores a 10 % después de compactada.

El porcentaje de material para agregado grueso teniendo en cuenta la granulometría y que la cantidad de agregado grueso es de 900 g mediante una regla de tres establecida por la ecuación 17.

Ecuación 17.

Regla de tres porcentaje de vacíos

$$1200 \rightarrow 100\%$$

$$900 \rightarrow X$$

$$X = 75\%$$

Mencionando que la gravedad específica de agregado grueso es de $2.44 g/cm^3$.

Por otra parte, el porcentaje de material para agregado fino teniendo en cuenta la granulometría y que la cantidad de agregado fino es de 300 g entonces el porcentaje de agregado fino es de:

$$1200 \rightarrow 100\%$$

$$300 \rightarrow X$$

$$X = 25\%$$

En donde la gravedad específica de agregado fino es de: 2.13 g/cm³. Para realizar este método inicialmente se debe calcular la gravedad específica máxima con la ecuación 18 y 19.

Ecuación 18.

Gravedad específica máxima

$$G_{mm} = \frac{100}{\sum \frac{\% \text{ cada material}}{G_{sp} \text{ de cada material}}}$$

Donde, **G_{mm}**: Gravedad específica máxima, **%**: de grava, arena y asfalto respectivamente.
G_{sp}: Gravedad específica de la grava, de la arena y del asfalto respectivamente.

Ecuación 19.

Volumen de vacíos

$$VA = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) * 100$$

Donde, **VA**: Volumen de vacíos, **G_{mb}**: Gravedad específica bulk promedio, **G_{mm}**: Gravedad específica máxima.

1.6. Determinar el comportamiento físico y mecánico de probetas de mezcla drenante adicionada con pellets de acuerdo con la normativa vigente.

1.6.1 Fabricación de briquetas de mezcla drenante modificada

Mediante las briquetas que fueron realizadas de forma convencional, se logra tener en cuenta que el porcentaje óptimo de asfalto para la fabricación de la mezcla asfáltica drenante modificada se debe tener en cuenta el porcentaje para cumplir con lo mencionado en el manual de diseño de pavimentos el cual es del 5% de asfalto según INVIAS año 2022.

Como se ha venido analizando anteriormente el diseño Marshall y lo mencionado anteriormente se permiten realizar 3 briquetas con el 70%, 30%, 50%, 20% y 10% de reemplazo del material PET. Para la sección que ocupa el tamiz de $\frac{3}{8}$ "", se reemplaza el cómo se cita en el capítulo 4.1.4 División porcentaje de pellets de plástico PET con agregado pétreo, y se realiza mediante la granulometría obtenida en la tabla número 2 (granulometría con porcentajes de reemplazo). Para su elaboración se precalienta 1200 g de material hasta alcanzar la temperatura de fabricación (170 °C) introduciendo los pellets también, se mezcló hasta obtener una consistencia homogénea en un tiempo menor a 60 segundos por cada briketa.

Posteriormente se vertió la mezcla en el molde el cual se encontraba a una temperatura de 140 °C con su respectivo collar, como en el diseño anterior, estos también son engrasados para evitar la adherencia del material. Posteriormente, al vertimiento se verifica que la mezcla se encuentre a temperatura de compactación (170 °C). Por último, se procede a colocar el conjunto en el ensamble para compactación de Marshall en donde se aplicaron 50 golpes a cada uno de los extremos; pasadas las 24 horas se realiza el retiro del molde y se obtuvieron las briquetas.

1.6.2 Resistencia a la disgregación INV-E 760

Según la norma INV E-760, el ensayo consiste en que la probeta tipo Marshall (compactada con 50 golpes por cara) y sin ser modificado, con un porcentaje de asfalto óptimo de 5% debe ser introducida en la máquina de ensayo de Los Ángeles sin la carga abrasiva a 300 revoluciones, en donde se debe extraer su masa inicial es decir antes del ensayo y su masa final. Como resultado del ensayo se obtiene el valor de la pérdida por desgaste, expresada en tanto por ciento de la masa

inicial, según el artículo 453 este desgaste no debe ser mayor a 25%. Para encontrar la adhesividad de las probetas se realiza la ecuación matemática 20.

Ecuación 20.

Pérdida por desgaste

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

Donde, **P**: Valor de la pérdida por desgaste de la probeta, %, **P1**: Masa inicial de la probeta, g, **P2**: Masa final de la probeta, g.

1.6.3 Estabilidad y flujo INV-E 748

La prueba se realizó 24 horas después de la fabricación de las probetas de mezcla tradicional en donde, las prensas Marshall se utilizan en las condiciones específicas a las dadas en la norma bajo condiciones normalizadas. Se colocan las probetas en un baño de agua durante 30 a 40 minutos. Posteriormente se retira la probeta y se seca los excesos de agua con una toalla, se introduce en la entrada de la mordaza inferior; se coloca la mordaza superior con el medidor de deformación; y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Antes de iniciar el ensayo el medidor de flujo se ajusta a cero y el vástago se mantiene firme contra la mordaza superior, el ensayo inicia aplicando la carga sobre la probeta hasta que ocurra la falla con una rata de deformación constante de 50 ± 5 mm/min, este proceso no debe demorar más de 30 segundos.

1.6.4 Prueba de permeabilidad (Artículo I.N.V.E 453/2013)

Este ensayo se realiza para asegurar de que los vacíos con aire estén correctamente interconectados entre ellos, consiste en determinar la capacidad de drenaje de 100 mililitros de agua en las briquetas modificadas previamente humedecidas y se mide el tiempo empleado en atravesar la muestra. Este no debe exceder los 15 segundos, el tiempo se midió con un cronómetro. Las probetas se instalaron en una superficie alta para facilitar la observación del paso del agua, debajo de ella se instaló un recipiente básico con el objetivo de verificar el paso del agua.

1.6.5 Ensayo de compresión simple INV-E 747

El ensayo de compresión simple de mezclas bituminosas es una técnica no muy común en la ingeniería para determinar las propiedades de deformación y resistencia de un material en este caso de las briquetas de mezcla drenante convencional, antes de realizar el ensayo de compresión simple en los especímenes, siguen varios pasos de preparación como lo son el dejar reposar durante al menos 2 horas a temperatura ambiente después de ser retirados del horno, luego de esto los especímenes se introducen en un baño de aire regulado a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante un mínimo de 4 horas; cada espécimen se coloca en el centro de la placa de carga de la máquina de ensayo y se somete a compresión axial sin soporte lateral. La velocidad de deformación vertical es constante, con un valor de 0.05 mm/min por mm de altura de la probeta, lo que equivale a una velocidad de deformación de 5.08 mm/min para probetas normalizadas, según la norma INV E 747 se podría clasificar este ensayo mediante la resistencia mínima de compresión en tránsito pesado, liviano y medio como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5.

Resistencia mínima a la compresión

Resistencia	Tránsito pesado	Tránsito medio	Tránsito liviano
Resistencia mínima a compresión, MPa	2.1	1.7	1.4

Nota. Resistencia mínima a la compresión y tipo de tránsito según la norma INV E- 747 de 2013

1.7 Analizar económicamente los resultados obtenidos de mezclas drenantes adicionadas con pellets en una carpeta de rodadura a comparación de mezclas convencionales.

En este caso se realizará el análisis del comportamiento de las mezclas drenantes fabricadas con y sin asfalto modificado para observar ventajas y desventajas de estas mezclas teniendo en cuenta las normas, determinando el porcentaje de plástico PET, comparando el nivel de asfaltos drenantes con asfaltos tradicionales, caracterizando los materiales para el diseño del asfalto.

1.7.1 Análisis de precios unitarios entre las dos mezclas

El análisis de precios unitarios para mezclas asfálticas en ingeniería civil y construcción de carreteras implica desglosar y calcular los costos de materiales, mano de obra, equipo y otros recursos necesarios. Esto incluye identificar los elementos de costo, medir las cantidades necesarias, obtener precios de materiales y mano de obra, calcular costos adicionales y ajustar por contingencias y utilidades. Luego se calculan los precios unitarios para cada tipo de mezcla y se revisan regularmente para mantenerlos actualizados.

1.7.2 Exploración en costos de producción.

Los valores varían en función de la actividad o de la cantidad específica. Por consiguiente, se detallan los precios de los materiales, la mano de obra, el equipo, las herramientas y el transporte necesarios para colocar un metro cúbico de asfalto poroso, tanto en su forma convencional como modificada. En este caso se tuvo en cuenta que los precios que son indicados tuvieron un proceso de APU el cual se llevó a cabo teniendo en cuenta las cantidades que son distribuidas para una briqueta de cada tipo.

2. Resultados

Para abordar la tesis propuesta, es crucial considerar una serie de situaciones definidas en diversos ensayos de laboratorio previamente vistos en la metodología; se planeó llevar a cabo pruebas para garantizar tanto la resistencia adecuada de la mezcla asfáltica drenante.

2.1. Diseñar mezcla drenante para una carpeta de rodadura de pavimento asfáltico adiciones de pellets de plástico PET.

2.1.1 Caracterización de agregados

A partir de los ensayos descritos anteriormente se realiza la compra de material de una de las canteras cercanas para determinar que los agregados cumplen los parámetros establecidos, si esto es así y se cumple, sus características físicas no afectarán negativamente en el diseño de las mezclas. La comparación de sus características técnicas se puede evidenciar como se menciona en la metodología, seguido de esto se prevé un breve resumen de los datos analizados.

2.1.1.1 Ensayo de desgaste INV E-218 (Grava). Como se menciona en el capítulo 4.1.5.1 se realiza el procedimiento de desgaste para tres muestras previamente preparadas y se desarrolla la ecuación, en donde se presentan los resultados finales de este ensayo mediante la tabla 6; los cálculos de este ensayo, se encuentran evidenciados en el anexo B, así mismo se realiza un promedio aritmético para calcular el % promedio de pérdidas.

Tabla 6.

Masa antes y después del ensayo con su respectivo porcentaje de pérdidas

Desgaste	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa 1 (g)	5005	5040	5010
Masa 2 (g)	3810	3782	3734

Pérdidas (%)	23.87	24.96	25.46
---------------------	-------	-------	-------

Al realizar el promedio de las tres pruebas se obtiene que:

$$\% \text{ pérdidas promedio} = \frac{23.87\% + 24.96\% + 25.46\%}{3}$$

$$\% \text{ pérdidas promedio} = 24.76\%$$

Gracias a lo anterior es posible observar que este porcentaje cumple con los requisitos establecidos en la norma INV E-218, la cual menciona que este desgaste debe ser menor al 25%.

2.1.1.2 Ensayo de desgaste INV E-218 (PET). En el capítulo 4.1.5.1 se lleva a cabo el procedimiento de desgaste para tres muestras preparadas previamente, seguido del desarrollo de una ecuación que arroja los resultados finales del ensayo, presentados en la tabla 7. Los cálculos específicos de este ensayo están detallados en el anexo D. Además, se calcula un promedio aritmético para determinar el porcentaje promedio de pérdidas.

Tabla 7.

Desgaste promedio del agregado PET

Desgaste PET	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa 1 (g)	2500	2500	2500
Masa 2 (g)	2120	2080	2100
Pérdidas (%)	15.2	16.8	16.0

Al realizar el promedio de las tres pruebas se obtiene que:

$$\% \text{ pérdidas promedio} = \frac{15.2\% + 16.8\% + 16\%}{3}$$
$$\% \text{ pérdidas promedio} = 16.0\%$$

Por lo cual es posible observar que este porcentaje cumple con los requisitos que se determinan en la norma, siendo menor al 25%, ya que su desgaste determina una durabilidad semejante a la grava en diferentes porcentajes como se muestra en la figura 4, e incluso un porcentaje de desgaste menor y por esta razón, es posible continuar con la realización de las briquetas correspondientes a la carpeta de rodadura.

Figura 4.

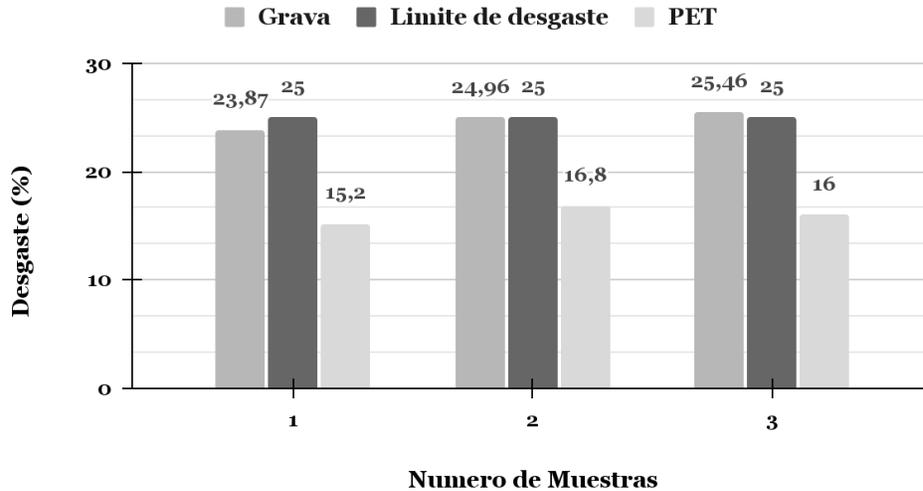
Desgaste agregado PET



Para contrastar estos dos resultados obtenidos se observa la (figura 5) en donde se grafican los 3 resultados obtenidos para grava y PET y el límite establecido por la norma.

Figura 5.

Gráfica de desgaste de las muestras



Es posible observar una diferencia significativa entre los 2 casos en este ensayo, en donde se puede observar un menor porcentaje de desgaste en el caso de los pellets y para el caso de la grava encontrándose cerca del límite de desgaste, lo cual hizo posible que se continúe con la respectiva división en porcentajes y la elaboración de la mezcla asfáltica modificada.

2.1.1.3 Impurezas del agregado grueso INV E-237. En el capítulo 4.1.5.2, se lleva a cabo el procedimiento de impurezas en tres muestras preparadas, seguido del desarrollo de una ecuación que presenta los resultados finales de este ensayo sobre humedad en la tabla 8. Los cálculos específicos de este ensayo están detallados en el anexo B. Además, se realiza un promedio aritmético para determinar el porcentaje promedio de humedad.

Tabla 8.*Humedad de las muestras*

Impurezas	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa 1 (g)	9	20	13
Masa 2 (g)	8	13	11
Humedad	0.125	0.538	0.182

En promedio la humedad del material corresponde a:

$$w \text{ promedio} = \frac{0.125 + 0.538 + 0.182}{3}$$

$$w \text{ promedio} = 0.282$$

Sin embargo, este porcentaje de impurezas será de 0 en este caso debido a que la muestra con la que se realizaron las briquetas fue previamente lavada, lo que esto nos proporciona que este porcentaje es de 0.

2.1.1.4 Índice de plasticidad INV E-125 y INV E-126. En el capítulo 4.1.5.3 se especifica el procedimiento para llevar a cabo el ensayo de índice de plasticidad para tres muestras preparadas previamente, y se formula una ecuación que muestra el límite líquido final de este ensayo en la tabla 9. Los cálculos de este ensayo se detallan en el anexo B. Se calcula un promedio aritmético para determinar el porcentaje promedio del límite líquido.

Tabla 9.*Resultados límite líquido*

Límite líquido	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
No. Golpes	24	20	22
Contenido de agua	28	28	28
Factor de corrección	0.995	1.009	0.985
L. líquido	27.26	27.24	27.58

En promedio el límite líquido corresponde a:

$$LL \text{ promedio} = \frac{27.86 + 27.24 + 27.58}{3}$$

$$LL \text{ promedio} = 27.56$$

$$LL \text{ promedio} = 28$$

Por esta razón, dentro del límite líquido (LL), en el cual se calculó el promedio de los tres contenidos de agua, con su correspondiente número de golpes, para obtener un valor que es redondeado al entero más cercano, se generó el valor correspondiente para este caso que es de 28. Se conoce que la arena no presenta índice de plasticidad y por lo cual es posible tomar su valor como su IP = 0 y teniendo en cuenta este valor de referencia, se establece que el límite plástico deberá igual o mayor que el límite líquido, y por esta condición, se conoce que el material es no plástico (NP).

2.1.1.5 Equivalente de arena INV E-133. En el capítulo 4.1.5.4 se proporcionó una descripción del procedimiento específico para llevar a cabo el ensayo en cuestión. Además, se presenta la ecuación 5, la cual desempeña un papel fundamental al evidenciar y facilitar la identificación de los resultados obtenidos. Estos resultados se presentan de manera ordenada en la tabla 10, la cual sirve como una herramienta para comprender y analizar los datos recopilados en el estudio. (Los cálculos de este ensayo, se evidencian en el anexo B).

Tabla 10.

Resultados equivalente de arena

Equivalente de arena	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura de arena (mm)	85	95	85
Lectura de arcilla (mm)	71	69	72
Resultado	119.71	137.68	118.05

Gracias a los datos previamente obtenidos, fue posible realizar un promedio para el ensayo de equivalente de arena, obteniendo lo siguiente:

$$EA \text{ promedio} = \frac{120 + 138 + 119}{3}$$

$$EA \text{ promedio} = 126$$

2.1.1.6 Partículas planas y alargadas INV E-230. Para desarrollar el ensayo de partículas planas y alargadas se establece el capítulo 4.1.5.5 se debe conocer la masa de la fracción d/D y la masa de las partículas planas o largas, según el índice que se desee calcular en este caso para 5 kg.

$$I = \frac{437}{5000} * 100$$

$$I = 8.74\%$$

Los resultados del ensayo proporcionan información sobre la forma de las partículas del agregado, lo que puede afectar las propiedades mecánicas y la trabajabilidad de las mezclas de asfalto. Partículas planas y alargadas pueden tener un impacto negativo en la resistencia y durabilidad de la mezcla, así como en su capacidad de compactación y estabilidad.

2.1.1.7 Ensayo de caras fracturadas INV E-227 (Grava). Para llevar a cabo este ensayo, se procedió a realizar una exhaustiva evaluación visual y mediante tacto de acuerdo al capítulo 4.1.5.7, de cada partícula de grava, con el fin de determinar la presencia de fracturas en su estructura. Dada la naturaleza triturada del material, se observó que todas las partículas presentaban evidentes señales de fracturación en sus caras. Este análisis meticuloso permitió identificar de manera precisa el estado de cada partícula, proporcionando así una comprensión más completa de las características del material examinado.

2.1.1.8 Ensayo de caras fracturadas INV E-227 (PET). Se realiza una inspección visual de cada partícula, dando como resultado que la mayor parte del agregado PET tiene las caras facturas, ya que los bloques fueron fracturados consiguiendo el tamiz de reemplazo de $\frac{3}{8}$ ".

2.1.1.9 Gravedad específica de agregado grueso INV-E 223. De acuerdo con lo mencionado en el capítulo 4.1.5.8, se presentan de forma ordenada cada uno de los resultados después de haber realizado el procedimiento y haber reemplazado los valores en la ecuación correspondiente, fue posible obtener los resultados consignados en la tabla 11, los cálculos de este ensayo, se encuentran evidenciados en el anexo B.

Tabla 11.*Resultados gravedad específica agregado grueso*

Gravedad específica agregado grueso	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A (g)	3877	3678	3789
B (g)	3960	3755	3804
C (g)	2352	2269	2133
Sh (g/cm³)	2.41	2.48	2.27

De acuerdo a los valores obtenidos, se realizó el promedio correspondiente de gravedad específica seca al horno para los agregados gruesos.

$$Sh = \frac{2.41 + 2.48 + 2.27}{3}$$

$$Sh = 2.39 \text{ g/cm}^3$$

2.1.1.10 Gravedad específica de agregado fino INV-E 222. De tal forma como se describe en el capítulo 4.1.5.9, se obtuvo el valor correspondiente a la gravedad específica para cada muestra de acuerdo con la ecuación 8 y posteriormente reemplazando los valores, se obtuvo los resultados que son indicados en la tabla 12; los cálculos que corresponden a este ensayo, se encuentran evidenciados en el anexo B.

Tabla 12.*Resultados gravedad específica agregado fino*

Gravedad específica agregado fino	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A (g)	473	475	487.7
B (g)	695	695	695.6
C (g)	915	913	956.8
S (g)	500	501	498.4
Sh (g/cm³)	1.69	1.678	2.06

De esta forma es posible obtener el valor promedio de gravedad específica seca al horno para agregados finos.

$$Sh = \frac{1.69 + 1.68 + 2.06}{3}$$

$$Sh = 1.81 \text{ g/cm}^3$$

Para una comprensión didáctica de los resultados obtenidos, se presenta de manera organizada en la tabla 13 una comparación directa entre los valores experimentales obtenidos y los valores establecidos por cada norma correspondiente en el artículo 453, de las especificaciones de construcción de carreteras de INVIA 2022. De esta manera, se garantiza una evaluación precisa y detallada de la conformidad de los resultados con los estándares requeridos.

Tabla 13.

Resultado de ensayos de agregado grueso

Características	Requisito	Resultado	Estado
Dureza de agregado grueso			
Desgaste de la máquina de los Ángeles, máximo: A 500 revoluciones	25	24.76	Cumple
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	20	N/A	-
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos	110	N/A	-
Valor en seco, mínimo (kN)	75	N/A	-
Relación húmedo / seco, mínimo (%)	75	N/A	-
Coefficiente de pulimento acelerado, mínimo	0.5	N/A	-
Durabilidad			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio, máximo (%)	18	N/A	-
Limpieza, agregado grueso			
Impurezas en agregado gruesos, máximo (%)	0.5	0	Cumple
Limpieza, gradación combinada			
Índice de plasticidad, máximo (%)	N. P	N. P	Cumple
Equivalente de arena, mínimo (%)	50	126	Cumple
Valor de azul de metileno, máximo	-	N/A	-
Geométrica de las partículas, agregado grueso			
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	10	8.7	Cumple
Caras fracturadas, mínimo (%) dos caras	100	100	Cumple

Nota. Ensayos necesarios para grava y arena del 453 del manual de diseño de carreteras de INVIAS 2022.

Observando la comparación brindada entre cada norma de ensayo y los resultados obtenidos, fue posible identificar que, para cada agregado y su correspondiente límite, se cumplió con los parámetros y esto permitió continuar con los demás ensayos para los agregados convencionales y el agregado de reemplazo que se utilizó.

2.1.2 Caracterización de ligante asfáltico

Para realizar la caracterización obtenida por el asfalto obtenido de la cantera de PANAVIAS se realiza la tabla mencionada por el artículo 453, mostrada en el anexo C. Ya con los ensayos establecidos se obtienen los resultados relevantes para el desarrollo de las muestras.

2.1.2.1 Penetración de materiales bituminosos INV E-706. La penetración de materiales bituminosos es una medida importante en la industria de la construcción y carreteras que evalúa la consistencia de los asfaltos, este parámetro indica la dureza o suavidad del material, este ensayo se encuentra descrito en el capítulo 4.1.5.10 de la metodología y lo cual es evidenciado de la tabla 14 para los tres ensayos realizado.

Tabla 14.

Penetración de material bituminoso

Muestra	No de ensayo	Penetración (mm)	Penetración promedio (1/10 mm)	Promedio (1/10 mm)
1	1	6,710	65,633	65,878
	2	6,550		
	3	6,430		
2	1	6,350	65,433	65,878
	2	6,520		
	3	6,760		
3	1	6,810	66,567	
	2	6,630		

3 6,530

De acuerdo con los resultados obtenidos, se tiene en cuenta que se necesita determinar la precisión definida por un operario y por lo cual se tiene en cuenta la ecuación 9 del capítulo 4.1.5.10 de la metodología.

$$a = 0.8 + 0.03(65.878 - 60)$$

$$a = 0.97$$

$$a = 0.97 * 100$$

$$a = 97.6\%$$

Gracias a esto se puede observar que la precisión se presenta con un valor del 97.6 %, es decir que este tiene una gran precisión. La penetración para este cemento asfáltico 60-70 cumple con los requisitos entrando dentro del valor mínimo y máximo establecido por la norma.

2.1.2.2 Punto de inflamación y combustión INV E-709. De acuerdo al procedimiento del capítulo 4.1.5.10 y la ecuación 10, se obtuvo el valor con el cual se produce la ignición sostenida en la muestra y esto se observa a continuación:

$$\text{Punto de inflamación} = 290 + 0.25(101.3 - 101.5)$$

$$\text{Punto de inflamación} = 289.95$$

$$\text{Punto de inflamación} = 290$$

Este valor hace referencia al punto de inflamación corregido, teniendo mayor exactitud, a comparación de la aproximación que se realiza en laboratorio ya que son valores obtenidos aproximados y no permiten conocer con exactitud la temperatura de este suceso.

2.1.2.3 Punto de ablandamiento INV E-712. Para el caso del punto de ablandamiento se debe tener en cuenta lo mencionado en el capítulo 4.1.5.11, en donde se logra establecer dichas configuraciones de temperatura a T1: 51° C y T2: 52° C. De acuerdo con el valor que se obtuvo mediante las 2 muestras de laboratorio, se realiza un promedio aritmético, con el fin de determinar la temperatura de ablandamiento, de la siguiente forma:

$$\text{Punto de ablandamiento} = \frac{51 + 52}{2}$$

$$\text{Punto de ablandamiento} = 51.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Punto de ablandamiento} = 52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este resultado hace referencia a la aproximación que se obtuvo del promedio que se presenta para las 2 temperaturas de ensayo, siendo esta de 52° C, cumpliendo con el valor mínimo y máximo establecido por la norma.

2.1.2.4 Viscosidad cinemática INV E-715. Para realizar la viscosidad cinemática del material se debe tener en cuenta lo mencionado en el capítulo 4.1.5.12, estos resultados se encuentran consignados en la tabla 15, en donde para cada 3 ensayos de viscosidad se obtienen tres temperaturas, a esto se le realizó un promedio aritmético para contemplar la viscosidad y temperatura promedio, en la cual se establece una temperatura de mezclado de 170 °C y de compactación es de 160 °C, o como se muestra en la figura 6.

Tabla 15.

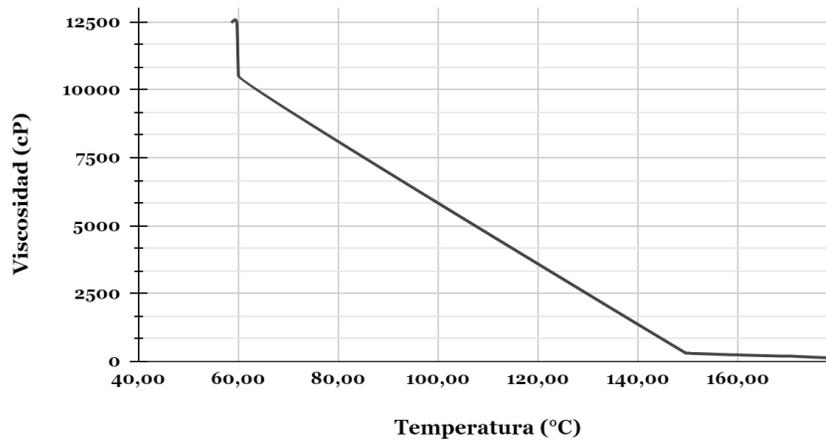
Viscosidad cinemática

Viscosidad (cP)	Promedio	Temperatura (°C)	Temperatura promedio
12423		58,7	
12465,76	11800	60,1	60
10511,7		59,8	
312,08	307	149,6	150

300,7		150,6	
308,01		150,3	
245,1		158,9	
239,3	244	159,7	160
246,7		160,5	
201,4		168,5	
197,4	200	170,2	170
200,5		170,5	
124,1		179,5	
100	107	180,6	180
96,2		180,8	

Figura 6.

Gráfica de viscosidad cinemática



2.1.2.5 Índice de Penetración en los cementos asfálticos I.N.V E – 724/213. Reemplazando es posible obtener lo siguiente datos tales como P de 65.878 y una temperatura de 52° C, para garantizar los siguientes resultados:

$$f = \frac{50 * \log\left(\frac{800}{P}\right)}{TAB - 25}$$

$$f = 2.01$$

Una vez obtenido este valor, es posible encontrar el índice de penetración de la siguiente manera:

$$IP = \frac{20 - 10 * 2.01}{1 + 2.01}$$

$$IP = -0.033$$

Este índice es posible observar que se encuentra dentro de los parámetros generales que se cumplen en la norma I.N.V E 724 en donde se muestra un rango establecido (-1.2 hasta 0.6).

Para comprender entonces de manera más certera y rápida los resultados obtenidos se muestra el cumplimiento del ligante asfáltico en la tabla 16.

Tabla 16.

Cumplimientos del ligante asfáltico

Características	Valor establecido		Valor experimental	Estado
	Mínimo	Máximo		
	60	70		
Asfalto original				
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1				
mm	60	70	65.87	CUMPLE
Punto de ablandamiento, °C	48	54	52	CUMPLE
Índice de penetración	-1.2	+ 0.6	0	CUMPLE
Viscosidad absoluta (60° C), P	150	-	170	CUMPLE
Solubilidad en tricloroetileno, %	99	-	-	-
Contenido de agua, %	-	0.2	-	-

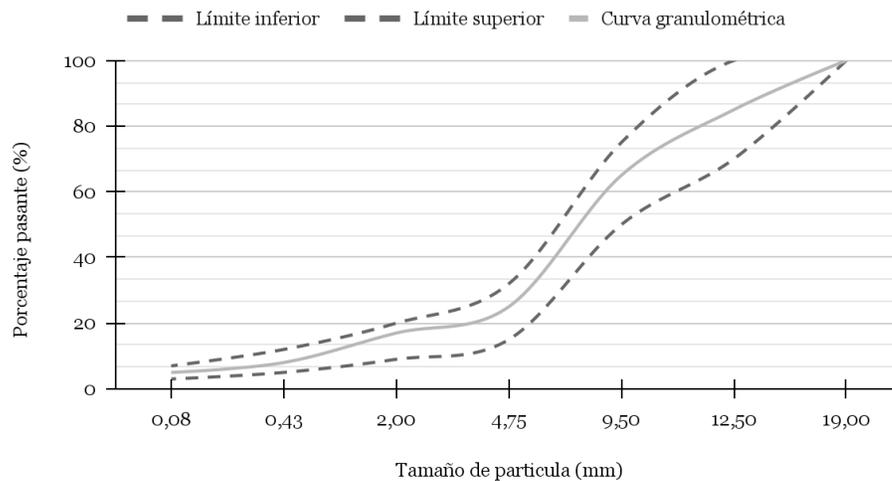
Punto de inflamación				
mediante copa abierta de Cleveland				
°C	230	-	290	CUMPLE
Contenido de parafinas, %	-	3	-	-

Nota. Ensayos necesarios para grava y arena del 410 del manual de diseño de carreteras de INVIAS 2022.

2.1.2.6 Granulometría INV-E 213. Teniendo en cuenta la tabla 1 de granulometría es posible revisar la gráfica granulométrica con los límites superior e inferior que permite revisar si el porcentaje de retenido en cada tamiz se encuentra dentro de lo establecido como se observa en la figura 7.

Figura 7.

Curva granulométrica



Esta curva granulométrica evidencia que estos valores obtenidos en la granulometría se encuentran dentro de los límites establecidos por el artículo 453 de las especificaciones de construcción de carreteras INVIAS 2022.

Para entonces realizar el diseño Marshall se tiene en cuenta la tabla 1 y se halla el porcentaje de asfalto, en la norma se especifica que para este tipo de mezclas drenantes el porcentaje de asfalto no puede ser menor a 4.5% , se puede utilizar este porcentaje para cada briqueta.

Sin embargo, se encuentra el porcentaje óptimo mediante ensayos de gravedad específica y vacíos de aire para porcentajes de asfalto de 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%, es por esto, que se calcula la cantidad de asfalto, para ejemplificar cómo se calcula la masa de asfalto para cada porcentaje se utiliza la ecuación 21.

Ecuación 21.

Ejemplo para encontrar la masa de cada porcentaje

$$Ma = \frac{4.5\%}{100} * 1200g$$
$$Ma = 54 g$$

Es decir que para cada porcentaje a analizar se realiza la ecuación anterior y se obtiene lo definido en la tabla 17.

Tabla 17.

Masa por cada porcentaje de asfalto

Porcentajes de asfalto (%)	Masa de asfalto (g)
4,5	54
5,0	60
5,5	66
6,0	72
5,0	60

Con estas cantidades se fabricaron 3 briquetas por cada porcentaje, para determinar el porcentaje de asfalto óptimo que conlleva cada briqueta de mezcla drenante convencional y modificada.

2.1.2.7 Gravedad específica Bulk INV-E 734. Después de llevar a cabo la medición y pesaje de la masa del espécimen tanto en estado seco como sumergido, tal como se describe en el apartado 4.2.3, se obtienen los resultados asignados mediante la ecuación 13 en la tabla 18.

Tabla 18.

Gravedad específica promedio por cada porcentaje

Gravedad Específica	Promedios de gravedad específica de cada porcentaje (g/cm^3)
Muestra 4.5% asfalto	1.95
Muestra 5% asfalto	1.87
Muestra 5.5% asfalto	1.88
Muestra 6% asfalto	1.89

Fueron utilizadas 3 muestras por cada uno de los porcentajes de asfalto para determinar el promedio de la gravedad específica, lo cual se muestra más detalladamente en el anexo E.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la gravedad específica con película de parafina como se menciona en el capítulo 4.2.3 y de acuerdo a la ecuación 14, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 19.

Tabla 19.*Promedio de gravedad específica de la parafina por cada porcentaje de asfalto*

Gravedad Específica de la película de parafina	Promedios de gravedad específica de cada porcentaje (g/cm^3)
Muestra 4.5% asfalto	0.86
Muestra 5% asfalto	1.14
Muestra 5.5% asfalto	1.16
Muestra 6% asfalto	1.12

Para este caso fueron seleccionadas 3 muestras de cada porcentaje de asfalto, sus masas correspondientes y la gravedad específica previamente realizada, como se muestra en el anexo F.

De acuerdo a estos valores, fue posible determinar el valor correspondiente a la gravedad específica bulk, según la ecuación 15 para poder organizar los valores correspondientes a la tabla 20 y esto es evidenciado de una forma más detallada en el anexo G.

Tabla 20.*Promedio gravedad específica Bulk*

Gravedad Específica Bulk	Promedios de gravedad específica bulk de cada porcentaje (g/cm^3)
Muestra 4.5% asfalto	1.96
Muestra 5% asfalto	1.87

Muestra 5.5% asfalto	1.88
Muestra 6% asfalto	1.90

Por otra parte, se debe calcular la densidad del espécimen ya que es muy útil tener en cuenta el concepto de densidad en la fabricación de estas briquetas para conocer cuál de estas es menos densa para que el agua haga que este espécimen flote en ella, teniendo en cuenta lo establecido en el capítulo 4.2.3 de acuerdo a la ecuación 16, para finalmente lleva a cabo la toma de datos que corresponde a la tabla 21.

Tabla 21.

Promedio de densidades

Densidad	Promedios de densidad en cada porcentaje (g/cm^3)
Muestra 4.5% asfalto	1.95
Muestra 5% asfalto	1.86
Muestra 5.5% asfalto	1.87
Muestra 6% asfalto	1.89

Finalmente, se determinó la densidad del espécimen (g/cm^3), teniendo en cuenta un factor de corrección, lo cual es evidenciado en el anexo H.

Una vez comprendidos estos valores se establece la siguiente información en la tabla 22 donde se consolidan los datos tomados anteriormente en cada apartado.

Tabla 22.

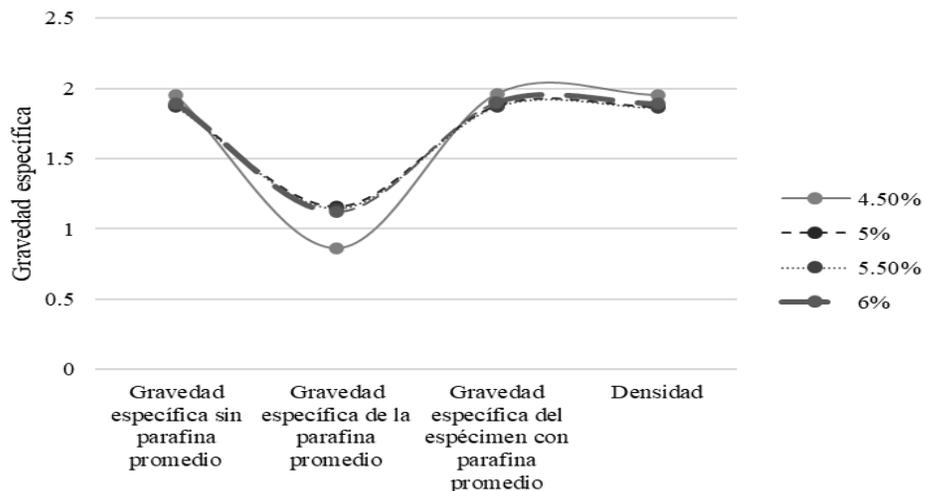
Resultados espécimen

Porcentaje de asfalto	Gravedad específica sin parafina promedio	Gravedad específica de la parafina promedio	Gravedad específica del espécimen con parafina promedio	Densidad del con
4.5%	1.95	0.86	1.96	1.95
5%	1.87	1.14	1.87	1.86
5.5%	1.88	1.16	1.88	1.87
6%	1.89	1.12	1.90	1.89

De otra manera se podrá establecer entonces que los datos consolidados de los resultados para gravedad específica se manejan de forma similar para cada porcentaje de asfalto como se muestra en la figura 8.

Figura 8.

Consolidación de datos



Sin embargo, para encontrar el porcentaje óptimo se debe establecer el porcentaje de vacíos producido en los especímenes.

2.1.2.8 Vacíos de aire en la mezcla INV-E 736. Para realizar los vacíos de aire del material se debe tener en cuenta lo mencionado en el capítulo 4.2.4 y se procede a determinar el acomodar el volumen efectivo de asfalto, determinando un porcentaje de asfalto óptimo, como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23.

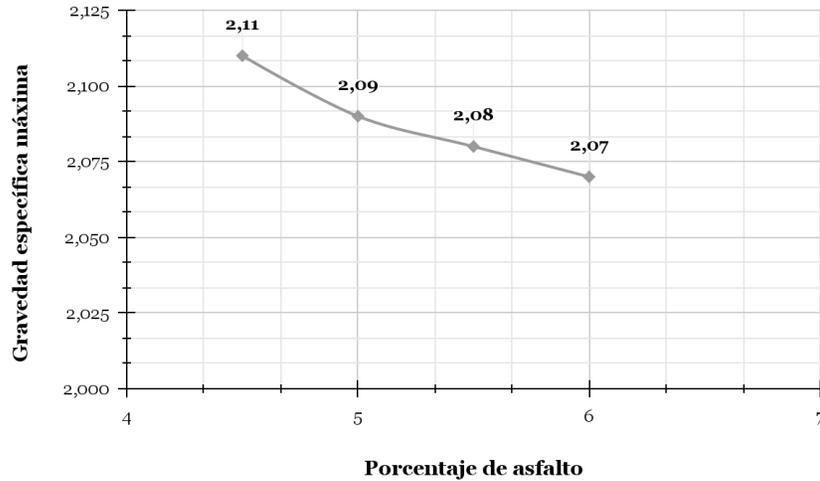
Gravedad específica máxima

% de asfalto	Gravedad específica máxima (Gmm)
4.5	2.11
5	2.09
5.5	2.08
6	2.07

Teniendo en cuenta la relación existente entre cada uno de los agregados y sus respectivas gravedades específicas, se realizó la gravedad específica máxima, en donde sus resultados y ecuaciones son indicadas en el anexo I, con el fin de obtener lo que se indica en la figura 9.

Figura 9.

Gravedad específica máxima



Una vez obtenidas estas gravedades específicas máximas, se procede a calcular el porcentaje de vacíos para determinar cuál es el porcentaje de asfalto que permite tener más cantidad de espacios en el espécimen, como se muestra en el capítulo 4.2.4 y en la ecuación 19, que permite obtener los resultados de la tabla 24.

Tabla 24.

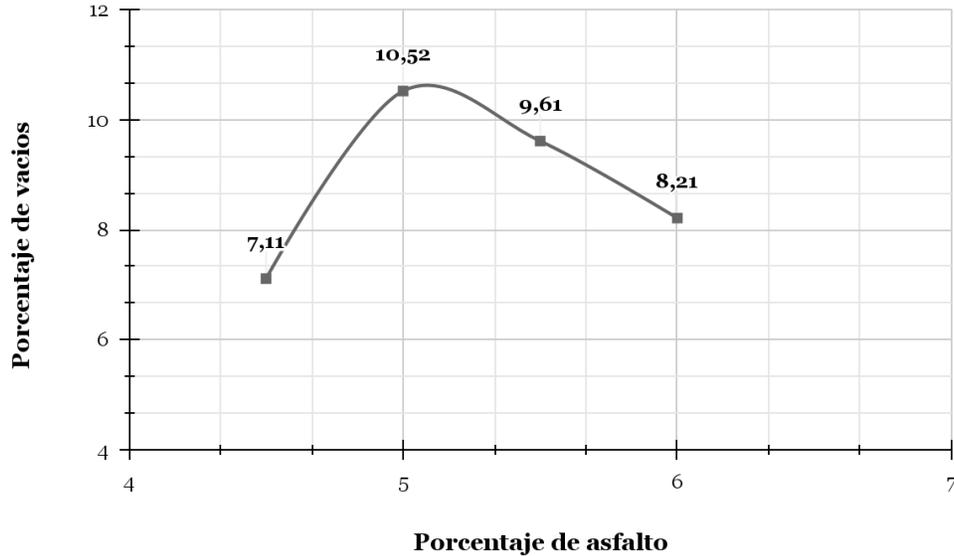
Porcentaje de vacíos por cada porcentaje de asfalto

% de asfalto	% de vacíos
4.5	7.11
5	10.52
5.5	9.61
6	8.21

Se definió el valor correspondiente de cada porcentaje de vacíos fue obtenido de acuerdo con lo indicado en el anexo J.

Figura 10.

Porcentaje de vacíos



Gracias a estos promedios, es posible determinar que el porcentaje óptimo de asfalto para los especímenes es de 5% es decir 60 g de asfalto por cada espécimen realizado, esto debido a que es el porcentaje que más se adecúa a los valores requeridos y cumple con la densidad, gravedad específica bulk y el porcentaje de vacíos realizados anteriormente.

2.2 Determinar el comportamiento físico y mecánico de probetas de mezcla drenante adicionada con pellets de acuerdo con la normativa vigente.

Las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de drenaje convencionales son esenciales para garantizar la eficacia y durabilidad de las infraestructuras viales, para optimizar su diseño y mantenimiento.

2.2.1 Resistencia a la disgregación para mezcla convencional y modificada

Según lo establecido en el capítulo 4.2.6 se establecen los valores por pérdida de desgaste y adherencia de las briquetas convencionales mediante las masas resueltas en la ecuación 20, de esta manera se consideran los siguientes valores consignados en la tabla 25 para el análisis promedio de estas pérdidas.

Tabla 25.

Resistencia a la disgregación en probetas convencionales

Desgaste PET	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa 1 (g)	1243	1240	1241
Masa 2 (g)	1061	1057	1060
Pérdidas (%)	14.64	14.76	14.60

$$P = \frac{14.64 + 14.76 + 14.60}{3}$$

$$P = 14.67\%$$

Es decir que el desgaste promedio de las probetas de mezcla asfáltica drenante convencional es de 15% lo que deja en claro que estas se encuentran por debajo del límite de desgaste, los cálculos correspondientes para encontrar el desgaste presente en las muestras convencionales se encuentran en el anexo K.

En cuanto a la adhesividad entre en agregado y los pellets de plástico PET, los cálculos correspondientes para encontrar el desgaste presente en las muestras convencionales se encuentran en el anexo L y se realiza de la misma manera que las muestras convencionales, en este caso para cada porcentaje como se evidencia en la tabla 26.

Tabla 26.

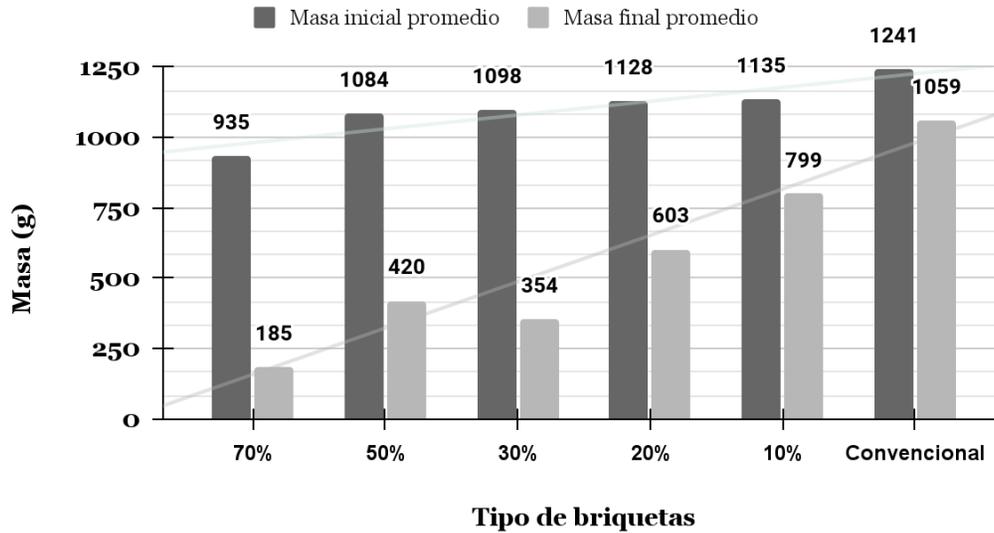
Resistencia a la disgregación en muestras modificadas

Muestras modificadas	Promedios de desgaste (%)	de Promedios de Adhesividad (%)
Muestra 70%	80	20
Muestra 50%	61	39
Muestra 30%	67	33
Muestra 20%	48	52
Muestra 10%	30	70

De acuerdo a los valores obtenidos en las mezclas convencionales y en las modificadas, se implementó una gráfica que relacione los datos que fueron organizados, con el fin de dar mayor claridad en la comparación de estas muestras que fueron realizadas, estos datos son observados en la figura 11.

Figura 11.

Resistencia a la disgregación



Durante el análisis de estos valores, se puede evidenciar un desgaste mayor, a medida que las briquetas tienen mayor porcentaje de reemplazo, a comparación de la convencional, que presenta un desgaste menor, dando como relación más específica y comprobada, el hecho de que el material PET no presenta porosidad y por esta razón su adherencia es menor que la de la grava ante este tipo de ensayos. Para comparar de manera aritmética lo sucedido como se muestra en la tabla 27, se establece un porcentaje de diferencia de la muestra convencional con las muestras modificadas.

Tabla 27.

Porcentaje de diferencia en Resistencia a la disgregación

Convencional	70%	50%	30%	20%	10%
15	80	61	67	48	30
Porcentaje de diferencia					
	81%	75%	78%	69%	50%

Lo que nos permite observar que para la muestra de 10% el porcentaje de diferencia es el menor, sin embargo, es bastante alto, por lo mencionado anteriormente.

2.2.2 Estabilidad y flujo Marshall para mezcla convencional y modificada

Para contemplar otro aspecto y someter estas muestras tanto convencionales como modificadas a otro tipo de fallo se establece la carga monotónica o también conocida como estabilidad y flujo Marshall, permitió conocer la carga máxima que soporta esta mezcla convencional, los datos se encuentran anexados en la tabla 28.

Tabla 28.

Estabilidad y flujo Marshall muestra convencional

No Briquetas	Factor de corrección	de Altura (mm)	Carga máxima (kN)	Estabilidad máxima corregida (kN)	Flujo (mm)
1	0,76	80	16,49	12,53	18,417

De acuerdo con estos resultados, se puede definir que el promedio de cargas que se obtuvo para las briquetas de mezcla tradicional es de 12 kN. Como se describe anteriormente se debe realizar este ensayo teniendo en cuenta que existen factores de correlación para la estabilidad de medida por la norma, sin embargo, se obtuvo que este factor fue obtenido mediante los datos suministrados dentro del ensayo es por eso que se organiza de esta manera.

Inicialmente se trabaja con el porcentaje de 70% sin embargo, en esta muestra ocurrió un fenómeno diferente al que se presenta normalmente, estas probetas a pesar de que llegaron a su carga máxima, la máquina continuó otorgando carga, hasta que esta se frenó manualmente esto se puede interpretar que en el ciclos de carga y descarga se debilitó la piezas lo que podría identificarse como cerca del límite elástico del material, este fenómeno se le conoce como “Fatiga”, se obtuvo que su carga al momento de la falla según la información, fue de 8.63 kN, aun así se demuestran los datos obtenidos en la tabla 29.

Tabla 29.

Estabilidad y flujo de Marshall muestras modificadas

No Briquetas	Factor de corrección	de Altura (mm)	Carga máxima (kN)	Estabilidad máxima corregida (kN)	Flujo (mm)
70%	0.76	83	8.61	6.54	18.417
50%	0.76	83	10.85	8.25	5.31
30%	0.76	77	12.61	9.58	4.16
20%	0.83	71	11.41	9.47	4.21
10%	0.81	73	15.65	12.68	2.83

De esta forma es posible definir todos los cálculos que son necesarios para encontrar la carga correspondiente a cada porcentaje y sus gráficas.

Gracias a esto es posible definir que las cargas para los porcentajes correspondientes se organizan de la siguiente forma comparando todas las mezclas drenantes se obtiene lo establecido en la tabla 30.

Tabla 30.

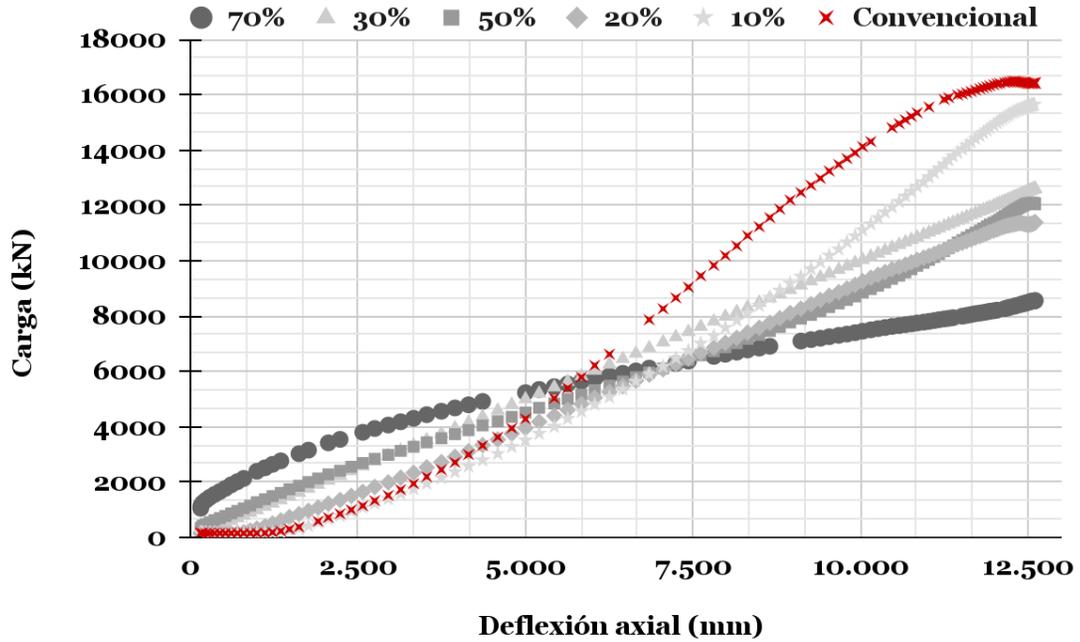
Valores estabilidad y flujo Marshall

Espécimen	70%	50%	30%	20%	10%	Convencional
Carga máxima (kN)	8,61	10,85	12,65	11,40	15,65	16,49

De acuerdo a los valores obtenidos en las mezclas convencionales y en las modificadas, se implementó una gráfica que relacione los datos que fueron organizados, con el fin de dar mayor claridad en la comparación de estas muestras que fueron realizadas, estos datos son observados en la figura 12.

Figura 12.

Estabilidad y flujo de Marshall



Durante el análisis de estos valores, se puede evidenciar que el soporte de carga comparación de la convencional, no es tan alto. Para comparar de manera aritmética lo sucedido como se muestra en la tabla 31, se establece un porcentaje de error de la muestra convencional con las muestras modificadas.

Tabla 31.*Porcentaje de diferencia en estabilidad y flujo de Marshall*

Convencion al	70 %	50%	30%	20%	10%
16,49	8,61	10,8 5	12,6 5	11,4 0	15,6 5
Porcentaje de diferencia					
	48	34	23	31	5

Lo que permite observar que para la muestra de 30% y 10% el porcentaje de diferencia es el menor.

2.2.3 Prueba de permeabilidad para mezcla drenante convencional y modificada

En este ensayo se determinaron 3 tomas de tiempo para cada briqueta convencional y modificada esto es evidenciado en el anexo N, lo cual determinó que el resultado obtenido se muestre diferentes tiempos de infiltración del agua para cada uno, este tiempo fue tomado desde el momento del contacto del agua con la briqueta, hasta el momento en el que la película de agua ya no se presenta, obteniendo casos distintos para cada porcentaje de reemplazo, como es establecido en el capítulo 4.2.8 y se desarrolla un promedio aritmético para establecer el tiempo medio de las tres pruebas que se registran en la tabla 32. Igualmente, para el tiempo promedio de las mezclas modificadas se establecen los valores de la tabla 33.

Tabla 32.

Resultados prueba de permeabilidad convencional

Espécimen	1	2	3
Tiempo de filtración (s)	14.28	14.82	16.25

Promedio de tiempo para briquetas convencionales:

$$Tiempo = \frac{14.28 + 14.82 + 16.25}{3}$$

$$Tiempo = 15.1 \text{ s}$$

Tabla 33.

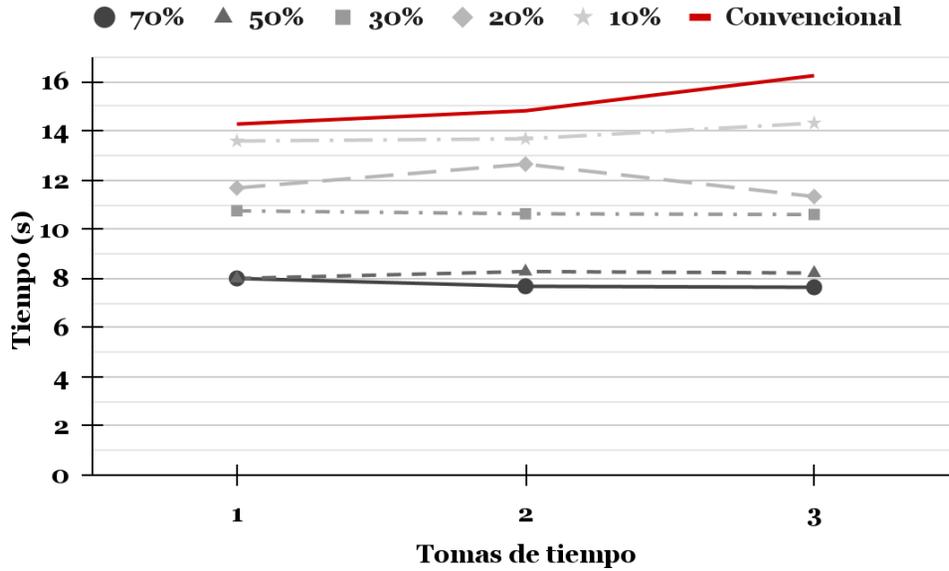
Permeabilidad promedio de mezcla modificada

Espécimen	70%	50%	30%	20%	10%
Infiltración	7.77s	8.16s	10.66s	11.89s	13.86s

Finalmente, el resultado el cual se evidencia si se realiza este ensayo, será que, para una biqueta con mayor porcentaje de reemplazo, la permeabilidad de ésta, será mayor; esto es posible diferenciarlo en la gráfica figura 13.

Figura 13.

Gráfica de permeabilidad



Se puede evidenciar que la permeabilidad a comparación de la convencional, es alta en tiempos de paso, para comparar de manera cualitativa lo sucedido, se presenta la tabla 34, en donde se verifica el cumplimiento mediante la norma el cual menciona que el valor no debe exceder los 15 segundos de filtración.

Tabla 34.

Cumplimiento de permeabilidad

Convencion					
al	70%	50%	30%	20%	10%
15,1	7,77	8,16	10,66	11,89	13,86
Valor teórico					
P<15					
Cumplimiento					
no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple

2.2.4 Ensayo de compresión simple para mezclas drenantes convencionales y modificadas

Como se menciona en el capítulo 4.2.9 tabla 5 este ensayo deja comprender el uso de las mezclas asfálticas de acuerdo a las resistencias mínimas a la compresión. En este caso para la mezcla convencional se realiza solo 1 toma del ensayo como se muestra en la tabla 35 lo que permite evidenciar la carga máxima que soporta la briqueta en kN, sin embargo, la resistencia máxima es la que define el tipo de tránsito a la cual puede ser sometida.

Tabla 35.

Ensayo compresión simple convencional

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (MPa)	Deflexión axial (mm)	Tipo de Tránsito
1	26.33	3.18	2.50	Pesado

De esta manera entonces se procede a realizar el ensayo de resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas para los porcentajes de 70%, 50%, 30%, 20% y 10% de la misma manera como se indica en la tabla 36.

Tabla 36.

Ensayo de compresión simple modificada

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (MPa)	Deflexión axial (mm)	Tipo de Tránsito
70%	9.21	1.131	2.85	N/A
50%	12.39	1.52	3.12	Liviano
30%	16.63	2.03	3.17	Medio

20%	18.05	2.21	2.67	Pesado
10%	24.26	2.95	2.86	Pesado

Se descarta el porcentaje de 70 para su uso debido a que este no llega a proporcionar ningún nivel de uso. Si se analiza las deflexiones axiales de los especímenes, se puede ver que la mayor de estas deflexiones la posee el 30%, lo que permite definir que esta deflexión muestra una mayor posibilidad de los especímenes a deformarse, antes de que ocurra la falla. Es posible evidenciar cada una de las gráficas y de las cargas que fueron obtenidas de forma más detallada en el anexo O.

Gracias a esto es posible definir que las cargas para los porcentajes correspondientes se organizan de la siguiente forma comparando todas las mezclas drenantes y convencional se obtiene lo establecido en la tabla 37.

Tabla 37.

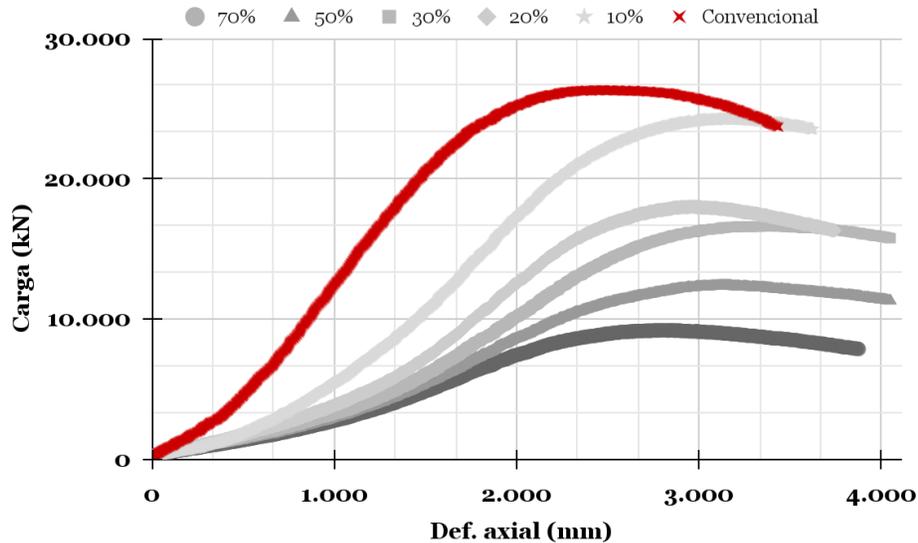
Ensayo de compresión simple

Espécimen	70%	50%	30%	20%	10%	Convencional
Resistencia máxima (MPa)	1.131	1.52	2.03	2.21	2.95	3.18

De acuerdo a los valores obtenidos en las mezclas convencionales y en las modificadas, se implementó una gráfica que relacione los datos que fueron organizados, con el fin de dar mayor claridad en la comparación de estas muestras que fueron realizadas, estos datos son observados en la figura 14.

Figura 14.

Gráfica de compresión simple



Durante el análisis de estos valores, se puede evidenciar que la resistencia máxima de la mezcla convencional, no es tan alta a comparación de las mezclas modificadas con menor porcentaje. Para comparar de manera aritmética lo sucedido como se muestra en la tabla 38, se establece un porcentaje de diferencia de la muestra convencional con las muestras modificadas.

Tabla 38.

Porcentaje de diferencia en compresión simple

Convencional	70%	50%	30%	20%	10%
3,18	1,13	1,5	2,03	2,2	2,9
	1	2		1	5
Porcentaje de diferencia					
	64%	52%	36%	31%	7%

Lo que permite observar que para la muestra de 10% el porcentaje de error es el menor. Una de las maneras más fáciles de comprender los resultados obtenidos es observando las muestras iniciales a comparación de las finales:

Figura 15.

Briquetas

(a) Briquetas antes del ensayo (b) Briquetas después del ensayo



2.3 Analizar económicamente los resultados obtenidos de mezclas drenantes adicionadas con pellets en una carpeta de rodadura a comparación de mezclas convencionales.

2.3.1 Análisis de precios unitarios entre las dos mezclas

Para realizar el análisis de precios unitarios se tiene en cuenta que para las mezclas este será diferente, por consiguiente, se establece inicialmente los valores de los materiales en este caso tanto grava y arena tuvieron un costo de \$6.000, el ligante asfáltico el promedio de galón tuvo un costo de \$25.000, en cuanto a transporte se tuvo un costo alrededor de \$13.400, en cuanto equipos y herramientas se utilizaron valores aproximados de cada instrumento ya que su uso es industrial para cada mezcla. Estos análisis de precios unitarios se encuentran en el anexo 15.

Es decir que la fabricación de una sola briqueta convencional tiene un costo aproximado de \$534.411. Por otra parte, para el costo total unitario de una briqueta de 70% el costo directo

incrementa \$12.026. Siguiendo, con el costo total unitario de una briqueta de 50% el costo directo incrementa \$11.830; Por otra parte, para el costo total unitario de una briqueta de 30% el costo directo incrementa \$11.634. Por el contrario, para el costo total unitario de una briqueta de 20% el costo directo incrementa \$11.830. Finalmente, para el costo total unitario de una briqueta de 10% el costo directo incrementa \$11.438. Es decir que el costo de todas las briquetas es de \$3.264.930. El análisis de los precios para las mezclas modificadas, se encuentran en el anexo P.

2.3.2. Exploración en costos de producción

2.3.2.1 Costo y presupuesto de mezcla convencional. Para determinar el costo, se tuvieron en cuenta los materiales necesarios para producir asfalto convencional, como grava, arena, asfalto y otros materiales de construcción. Esto permitió calcular con precisión el costo total del asfalto convencional, teniendo en cuenta el APU observado en el capítulo 5.3, se determina cierto porcentaje para imprevistos, utilidad y administración, con el fin de generar la creación de cada briqueta con mayor solvencia, esto es observado en el anexo Q y de la misma forma, en la tabla 39 se observa una vista previa de dichos valores.

Tabla 39.

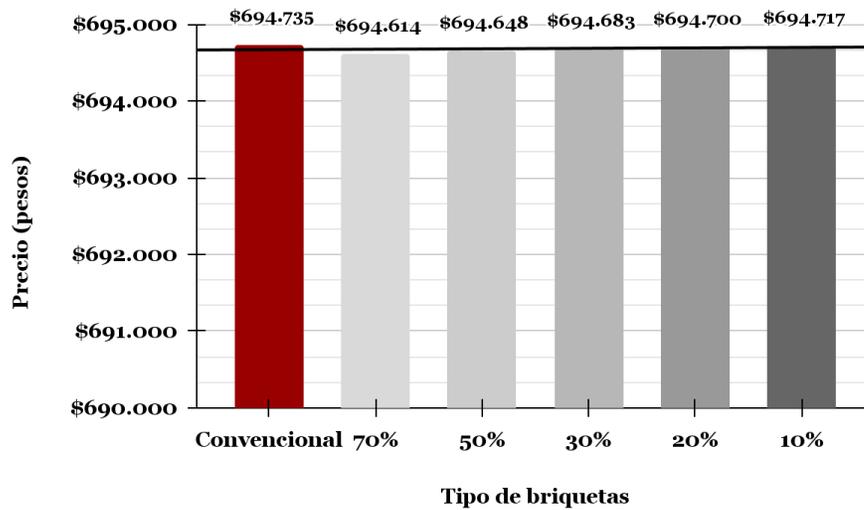
Costo briqueta convencional

Briqueta convencional	
Total, costos directos de obra	\$534.411
Total, costos indirectos de obra	\$160.323
TOTAL DE LA OBRA	\$694.735

2.3.2.2 Costo y presupuesto de mezclas modificadas. Para calcular el costo de reemplazar el agregado grueso en el tamiz de $\frac{3}{8}$ " por plástico PET, clasificado en los porcentajes de 70%, 50%, 30%, 20% y 10%; se recolectó plástico PET en establecimientos públicos de Pasto, Nariño. Además de esto, se consideró el precio por kilogramo de plástico PET que se tiene en el mercado, así como el costo del material tradicional utilizado en la mezcla mejorada, para calcular el costo total de esta mezcla, esto se presenta en el anexo Q para mayor claridad, además es presentada la figura 16 que indica el precio para cada briqueta. Es decir que el costo se puede analizar de la siguiente manera.

Figura 16.

Grafica diferencia de costos de las briquetas



En la gráfica es posible observar los precios que son diferenciados para cada porcentaje, se observa un aumento que no es muy significativo, en el precio que tendrían las briquetas modificadas a comparación de las convencionales. Sin embargo, este precio fue tomado de acuerdo con un valor de compra, pero en este proyecto la idea principal es que este material sea recolectado y esto fue lo que se hizo para realizar las briquetas, es un proceso de reciclaje en el que se observa un costo menor; ya sea desde la obtención de este por reciclaje (que es lo ideal) o por su compra en empresas recicladoras, aun así, este proceso evita un mayor gasto y extracción en materiales de las canteras.

Es decir que el total de la obra será de \$4'179.000, sin embargo, se debe tener en cuenta que, tanto para el transporte de plástico, como para la recolección de PET, este fue entregado de manera gratuita, lo que permite invertir menos de lo que se está dando a conocer, a continuación de forma más clara se presentan los precios en la tabla 40, en donde se observa la diferencia a comparación de la convencional.

Tabla 40.

Costo por briquetas y su diferencia

Costos		
Convencion	\$89.0	
al	69	\$0
	\$89.0	
70%	48	\$20
	\$89.0	
50%	54	\$14
	\$89.0	
30%	60	\$9
	\$89.0	
20%	63	\$6
	\$89.0	
10%	66	\$3

3. Conclusiones

Fue posible identificar que gracias a la incorporación de pellets de plástico PET, en la mezcla drenante para la carpeta de rodadura del pavimento asfáltico, siendo una innovación con potenciales beneficios, tanto ambientales, como de rendimiento, no solo ofreció una solución para evitar la sobreproducción y acumulación de residuos plásticos, sino que también se espera y se pretende, que se reduzca el riesgo de inundaciones, por esto, se da a conocer que se utilizan 46 botellas pequeñas de 245 ml y 26 botellas grandes de 500 ml. Sin embargo, la implementación adecuada de este tipo de pavimento debe tener en cuenta las características del material a definir de tal forma que se genere una proporción óptima dentro de la mezcla y así generar seguridad en primera instancia, para definir los correspondientes ensayos que se deben realizar e identificar la compatibilidad de materiales y la evaluación de la durabilidad a largo plazo. En última instancia, este enfoque representa un paso significativo hacia la construcción de infraestructuras más sostenibles y resilientes.

En conclusión, de acuerdo a cada uno de los ensayos que fueron realizados para los especímenes de mezcla convencional y de mezcla modificada, se determinó el comportamiento físico y mecánico, mediante 4 ensayos los cuales permiten analizar que la mezcla convencional presenta características que no se alejan de la normativa y permiten que esta implementación y reemplazo sea de forma correcta para ciertas cantidades de este mismo reemplazo; esto se pudo evidenciar en que para cada ensayo distinto, los especímenes logran acercarse a los parámetros establecidos y se garantiza calidad y seguridad en la infraestructura, además de aprovechar los beneficios ambientales y el rendimiento correspondiente, teniendo variaciones que aseguran su implementación en los casos que sea necesario; como lo son la permeabilidad, en donde el tiempo de infiltración se reduce de un máximo de 15,1s en la convencional a un mínimo de 7,77s en la modificada, estabilidad y flujo, en la cual se da a conocer que la resistencia es alta, comparando el caso convencional y el modificado con valores de 16,49 y 15,65 kN respectivamente, compresión simple, en donde los casos a partir del 50% de reemplazo tienen funcionamiento en tránsito liviano a pesado, progresivamente a medida de que disminuye el porcentaje de reemplazo y adherencia.

Además, se observó un tiempo de infiltración adecuado, una estabilidad y flujo que establece una deformación a lo largo del tiempo que se encuentra en un rango alto antes de que se produzca la falla en cada una de las briquetas cumpliendo el rango que establece la norma para 50 golpes, identificando un tránsito NT1 o mayor, teniendo en cuenta que al aumentar cada porcentaje, disminuye su carga máxima, también una compresión simple y finalmente una adherencia que representa un desgaste mayor, a medida de que en las briquetas se establece un porcentaje mayor de reemplazo de pellets de PET, siendo el único parámetro poco efectivo en general de las mezclas.

Finalmente, se pudo observar que gracias a los valores obtenidos en cada una de las pruebas de laboratorio, se presenta una baja diferencia al momento de comparar las muestras convencionales y las muestras modificadas, ya que los resultados, brindan la información necesaria para determinar que estas muestras presentan grandes beneficios al momento de realizar el reemplazo correspondiente; inicialmente, desde los resultados presentados para las partículas de pellets, se observó un comportamiento favorable, con la tendencia a ser un reemplazo adecuado y en ciertas propiedades, garantizando valores que superaron de cierta forma lo obtenido por las partículas de grava, continuando con su comportamiento frente a las impurezas, en donde se sabía que estas partículas fueron previamente llevadas a un proceso de limpieza y finalmente con su beneficio tanto ambiental, como en las comunidades, al momento de generar el reciclaje y reutilización de grandes cantidades de botellas plásticas, que a su vez, disminuyen la explotación de materiales pétreos.

Por otra parte, dentro del mismo análisis, se observó en las briquetas modificadas una mejoría en los tiempos de infiltración para el ensayo de permeabilidad y puede ser la solución a problemas de inundaciones y encharcamientos, además de valores cercanos a las briquetas convencionales permeables en cuanto a los ensayos de compresión simple y carga monotónica que generan seguridad al momento de implementarlos en una carpeta de rodadura, para tránsito liviano con un reemplazo del 50%, medio con un reemplazo del 30% y pesado con los reemplazos de 20% y 10% en el tamiz de $\frac{3}{8}$ ", dando así una variedad de opciones de reemplazo según el caso que se requiera

Los costos presentados por esta implementación, no superan los costos que ya se tiene por defecto en este tipo de métodos de construcción de carreteras, ya que existen 2 opciones de obtención de este material, una a través del reciclaje y la otra a través de la compra por kilogramo de este material, que igualmente brinda beneficios sin costos elevados y lo más importante, con resultados favorables ante la seguridad vial y con variedad de implementaciones.

4. Recomendaciones

Se sugiere aumentar la utilización de este tipo de mezclas asfálticas, ya que no solo mejoran el aspecto estético de la ciudad, ya que también ayudan en la captación y almacenamiento del agua de lluvia. Esta agua, una vez tratada adecuadamente, puede ser reutilizada en labores de limpieza, lo que promueve la construcción sostenible; es imprescindible verificar el tipo de polímero presente, identificándose mediante el símbolo de reciclaje. Además, se debe llevar a cabo una limpieza meticulosa del material para evitar cualquier reacción química durante la mezcla, se recomienda el uso de imán para recolectar las partículas metálicas que puedan alterar las propiedades del material en el momento en el que se realiza la fundición.

Se propone investigar y aplicar métodos de diseño avanzados para mezclas asfálticas drenantes, como la metodología Superpave, que define los vacíos del agregado mineral, como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo en una muestra compactada. Esto es relevante ya que el método de diseño actual es empírico y aunque brinda buenos resultados, la implementación de nuevos materiales de construcción puede ser mejorada.

Se propone realizar el análisis de la contaminación generada por la fundición del material PET ya que esta emite metano y etileno, dos potentes gases de efecto invernadero y cómo se podría disminuir por medio de filtros.

Para mejorar la durabilidad y resistencia de las mezclas asfálticas drenantes en caliente, se recomienda utilizar aditivos químicos adherentes como polímeros modificados con elastómeros. Estos aditivos ayudan a mejorar la adhesión entre el asfalto y los agregados, lo que resulta en una mayor resistencia a la fatiga y a la abrasión. Además, los aditivos adherentes también contribuyen a reducir la formación de grietas y la segregación de los agregados, mejorando así la calidad y la vida útil de la mezcla asfáltica. Por lo tanto, se sugiere incorporar estos aditivos en el diseño de mezclas asfálticas drenantes en caliente para obtener un pavimento más duradero y de mejor rendimiento; por otra parte, para aumentar la adherencia de la mezcla, se propone realizar adiciones en porcentajes más pequeños o en tamaños menores al de $\frac{3}{8}$ ya que éste ocasionó una pérdida de la adhesión con los materiales pétreos y el ligante asfáltico.

Referencias

- Asociación Instituto De Normas Técnicas De Costa Rica. (s.f.) *Contenido de vacío de agregado fino no compactado (influenciado por la forma de partículas, textura de superficie y graduación)*. Asociación Instituto De Normas Técnicas De Costa Rica. https://www.inteco.org/en_us/shop/inte-c428-2020-contenido-de-vacio-de-agregado-fino-no-compactado-influenciado-por-la-forma-de-particulas-textura-de-superficie-y-graduacion-metodo-de-ensayo-6002
- Blog Danzé Trade. (2021). Mini peletizadoras de plástico para pruebas de laboratorio. Maquinaria y materiales para los sectores del plástico, espumas, papel y cartón. *Blog Danzé Trade*. <http://blog.fdtecsl.com/peletizadoras-pequenas-pruebas-plasticos>
- Castellet, B. (2022). *Análisis de la capacidad de reducción del riesgo de inundación en zona urbana mediante el uso de pavimentos drenantes* (Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya). <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/377838?show=full>
- Cruz, S. (2019). *Propuesta de diseño de pavimento drenante para la captación de agua de lluvias en zonas urbanas del norte del Perú* (Trabajo de grado, Universidad Peruana de Ciencias aplicadas). <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625617>
- Doble A Lab. (2012). *Norma y especificaciones del INVIAS. Determinación de los factores de contracción de los suelos por el método de la parafina*. Doble A Lab. <https://www.doblea.com.co/wp-content/uploads/2021/04/Inv-129-13.pdf>
- Dolmen.com. (2021). *Fatiga en los pavimentos flexibles*. Dolmen.com. <https://dolmen.com.ar/fatiga-en-los-pavimentos-flexibles/>
- Empresas Públicas de Medellín-EPM. (2016). *Norma de construcción sub-base y base para pavimento*. EPM. https://www.epm.com.co/site/portals/3/documentos/aguas/nc-mn-oc/nc_mn_oc05_02_subbase_y_base_para_pavimento.pdf?ver=2020-11-17-143418-887

Fernández, R., y Navas, A. (2011). Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. *Rev. Infraestructura Vial*, 13(24), 40-49. <https://www.redalyc.org/pdf/4782/478276563005.pdf>

Ferrovial.com. (s.f.). *Asfalto*. Ferrovial.com. <https://www.ferrovial.com/es/recursos/asfalto>

Financiera de Desarrollo Territorial-FIDETER. (2014). *Normas y especificaciones de INVIAS, capítulo 6 Excavaciones Varias*. FINETER. https://www.findeter.gov.co/system/files/convocatorias/paf-atjamundi-o-021-2022/capitulo_6_1.pdf

Garnica, P., Delgado, H., y Sandoval, C. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt272.pdf>

Grupo Pineda. (2020). *Construcción de pistas de hormigón*. Grupo Pineda. <https://grupopineda.eu/madrid/empresa/construccion/pistas/hormigon-poroso/>

Gómez, J. (2017). *Evaluación técnica, ambiental y económica, de pavimentos asfálticos drenantes en Colombia* (Trabajo de grado, Universidad EIA). https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2096/Gonzalezjuan_2018_Evaluacion_tecnicaambiental.pdf;jsessionid=C09a83460485c3e668ceeeacccc11153?Sequence=1

Herrera, J., y Valencia, A. (2021). *Mezcla asfáltica modificada con PET características que aporta el PET (polietileno tereftalato) en la mezcla de asfalto* (Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia). <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/57e75e8a-b44a-481b-8a85-7952ae308aa7>

Instituto Nacional De Vías-INVIAS. (2022). *Mezcla drenante artículo 453 – 22. 27*. INVIAS. <https://www.gerconcesion.co/invias2013/453%20MEZCLA%20DRENANTE.pdf>

- Instituto Nacional De Vías-INVIAS. (2014). *Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena-asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos*. INVIAS. <https://Www.Invias.Gov.Co/Index.Php/Archivo-Y-Documentos/Puente-Sobre-El-Rio-Magdalena-En-Barranquilla/2903-5-Capitulo-4>
- López, A. T., y Lasprilla, D. P. Q. (2013). *Pavimentos porosos utilizados como alternativas en sistemas de drenaje* (Trabajo de grado, Pontificada Universidad Javeriana). [https://Repository.Javeriana.Edu.Co/Bitstream/Handle/10554/11174/Trujillolopezalejan\(2009\)dra2013.Pdf?Sequence=1](https://Repository.Javeriana.Edu.Co/Bitstream/Handle/10554/11174/Trujillolopezalejan(2009)dra2013.Pdf?Sequence=1)
- Martinez, J. E. (2018). *Predicción de fallas por escalonamiento en las estructuras pavimento rígido propuestas dentro del manual de diseño de pavimentos de concreto para bajos, medios y altos volúmenes de tránsito del invias, empleando el modelos de deterioro de pavimentos rígidos Napcom* (Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada). <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17236>
- Metaute, D., y Casas, D. (2009). *Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos* (Trabajo de grado, Universidad EAFIT). <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/15849b6d-d298-434e-82f8-dd57647fb460/content>
- Moreno, N. (2004). *Caracterización de hormigón poroso para pavimentos drenantes* (Trabajo de grado, Universidad de Los Andes). <https://Repositorio.Uniandes.Edu.Co/Bitstream/Handle/1992/21320/U250737.Pdf?Sequence=1>

- Orejuela, J., y Hernandez, C. (2018). *Diseño, construcción y calibración de un permeámetro lcs para mezclas asfálticas drenantes* (Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia). <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/a8d5b6b2-8ee0-4a69-9c46-495314b49983/content>
- Ortega, Á. (2015). *Estudio de una mezcla en concreto con estructura drenante fabricado con agregados de las fuentes de abastecimiento del municipio de Ipiales* (Trabajo de grado, Universidad de Nariño). [Http://Sired.Udenar.Edu.Co/2935/](http://Sired.Udenar.Edu.Co/2935/)
- Plastico.com. (2020). *Cemex Ventures reciclará plástico para producir concreto y agregados mediante su inversión en Arqlite*. Plastico.com. <https://www.plastico.com/es/noticias/cemex-ventures-reciclar-plastico-para-producir-concreto-y-agregados-mediante-su-inversion>
- Reyes, F. (2002). Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes. *Rev. Ingeniería de Construcción*, 17(2), 93-102. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10126>
- Rodríguez, K., y Castañeda, P. (2018). *Variación de la permeabilidad de pavimentos drenantes, elaborados con gravas de TMN 1" Y 1/2"* (Trabajo de grado, Universidad Piloto). <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5688>
- Rondón, H., y Reyes, F. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. Eco Ediciones.
- Roulet, G. (2009). *Seguimiento y comparación de caminos de pavimento asfáltico con mezcla drenante* (Trabajo de grado, Universidad Austral de Chile). [Http://Cybertesis.Uach.Cl/Tesis/Uach/2009/Bmfcir859s/Doc/Bmfcir859s.Pdf](http://Cybertesis.Uach.Cl/Tesis/Uach/2009/Bmfcir859s/Doc/Bmfcir859s.Pdf)
- Studocu.com. (s.f.). *Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto (Inv E 217-13)*. Studocu.com. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-del-atlantico/fisica/informe-3/14139319>

Universidad de los Andes. (2019). *Casi el 60 % de la basura diaria de Bogotá es desecho plástico.*

Universidad de Los Andes. <https://derecho.uniandes.edu.co/es/informe-situacion-actual-de-los-plasticos-en-colombia>

Vargas, J. (2017). *Obtención de una mezcla de concreto con residuos plásticos de equipos electrónicos para la fabricación de elementos no estructurales* (Trabajo de grado, Universidad De La Costa).

<https://Repositorio.Cuc.Edu.Co/Bitstream/Handle/11323/212/1140871558%20-%201140875540.Pdf?Isallowed=Y&Sequence=1>

Velasco, J., y Camargo, J. (2019). *Mejoramiento de mezclas asfálticas porosas a través de la incorporación de fibras de nylon y polipropileno* (Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia).

<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/78bb9b87-1ed5-4d63-aeac-62128d704eb4/content>

Anexos

Anexo A. Ensayo de los agregados

Rangos según la norma de ensayo para el agregado

Características	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito NT2 Y NT3
Dureza de agregado grueso		
Desgaste de la máquina de los Ángeles, máximo: A 500 revoluciones	E-218	25
Degradación por abrasión en el equipo		
Micro-Deval, máximo (%)	E-238	5
Resistencia mecánica por el método del 10		
% de finos	E-224	20
Valor en seco, mínimo (kN)	E-224	110
Relación húmedo / seco, mínimo (%)	E-224	75
Coefficiente de pulimento acelerado, mínimo	E-232	0.50
Durabilidad		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato		
de sodio, máximo (%)	E-220	18
Limpieza, agregado grueso		
Impurezas en agregado gruesos, máximo (%)	E-237	0.5
Limpieza, gradación combinada		
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125	N.P
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-218	50
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10
Geométrica de las partículas, agregado grueso		
Partículas planas y alargadas, relación 5: 1, máximo (%)	E-240	10
Caras fracturadas, mínimo (%) dos caras	E-227	100

Anexo B. Ensayos de desgaste

→ Ensayo de desgaste agregado grueso

- Muestra 1

P1:5005 g

P2:3810 g

$$\% \text{pérdidas} = \frac{5005 - 3810}{5005} * 100$$

$$\text{pérdidas } l = 23.87\%$$

- Muestra 2

P1:5040 g

P2:3782 g

$$\% \text{pérdidas} = \frac{5040 - 3782}{5040} * 100$$

$$\text{pérdidas } l = 24.96\%$$

- Muestra 3

P1:5010 g

P2:3734 g

$$\% \text{pérdidas} = \frac{5010 - 3734}{5010} * 100$$

$$\text{pérdidas } l = 25.46\%$$

→ Impurezas de agregado grueso

- Muestra 1

Mh: 9 g

Ms: 8 g

$$w = \frac{9 - 8}{8}$$

$$w = 0.125$$

- Muestra 2

Mh: 20 g

Ms: 13 g

$$w = \frac{20 - 13}{13}$$

$$w = 0.538$$

- Muestra 3

Mh: 13 g

Ms: 11 g

$$w = \frac{13 - 11}{11}$$

$$w = 0.182$$

→ **Índice de plasticidad**

- Muestra 1

N: 24

Wn: 28

K: 0.995

$$LL = 0.995 * 28$$

$$LL = 27.86$$

- Muestra 2

N:20

Wn: 28

K: 1.009

$$LL = 0.973 * 28$$

$$LL = 27.24$$

- Muestra 3

N: 22

Wn: 28

K: 0.985

$$LL = 0.985 * 28$$

$$LL = 27.58$$

→ **Equivalente de arena**

- Muestra 1

Lectura de arena: 85mm

Lectura de arcilla: 71 mm menos 254 mm (10") del nivel marcado por el borde superior del indicador.

$$EA = \frac{85}{71} * 100$$

$$EA = 119.71$$

- Muestra 2

lectura de arena: 95

lectura de arcilla: 69 mm menos 254 mm (10") del nivel marcado por el borde superior del indicador

$$EA = \frac{95}{69} * 100$$
$$EA = 137.68$$

- Muestra 3

lectura de arena: 85 mm

lectura de arcilla: 72 mm menos 254 mm (10") del nivel marcado por el borde superior del indicador

$$EA = \frac{85}{72} * 100$$
$$EA = 118.05$$

→ **Gravedad específica agregado grueso**

- Muestra 1

A: 3877 g

B: 3960 g

C: 2352 g

$$Sh = \frac{3877}{3960 - 2352}$$
$$Sh = 2.41 \text{ g/cm}^3$$

- Muestra 2

A: 3678 g

B: 3755 g

C: 2269 g

$$Sh = \frac{3678}{3755 - 2269}$$

$$Sh = 2.48 \text{ g/cm}^3$$

- Muestra 3

A: 3789 g

B: 3804 g

C: 2133 g

$$Sh = \frac{3789}{3804 - 2133}$$

$$Sh = 2.27 \text{ g/cm}^3$$

→ **Gravedad específica agregado fino**

- Muestra 1

A: 473 g

B: 695 g

C: 915 g

S: 500 g

$$Sh = \frac{473}{695 + 500 - 915}$$

$$Sh = 1.69 \text{ g/cm}^3$$

- Muestra 2

A: 475 g

B: 695 g

C: 913 g

S: 501 g

$$Sh = \frac{475}{695 + 501 - 913}$$
$$Sh = 1.678 \text{ g/cm}^3$$

- Muestra 3

A: 487.7 g

B: 695.6 g

C: 956.8 g

S: 498.4 g

$$Sh = \frac{487.7}{695.6 + 498.4 - 956.8}$$
$$Sh = 2.06 \text{ g/cm}^3$$

Anexo C. Pruebas de ligante asfáltico

Rangos para las normas de ligante asfáltico

Características	Norma de ensayo INV	60-70	
		Min	Max
Penetración [25° C, 100 g, 5s), 0.1 mm	E-706	60	70
Punto de ablandamiento, °C	E-712	48	54
Índice de penetración	E-724	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60° C), P	E-716 E-717	150 0	-
Ductilidad (25°C, 5 cm/min), cm	E-702	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E-713	99	-
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E-709	230	-

Anexo D. Desgaste en PET

- Muestra 1

P1:2500 g

P2:2120 g

$$\% \text{pérdidas} = \frac{2500 - 2120}{2500} * 100$$

$$\text{pérdidas 1} = 15,2\%$$

- Muestra 2

P1:2500 g

P2:2080 g

$$\% \text{pérdidas} = \frac{2500 - 2080}{2500} * 100$$

$$\text{pérdidas 2} = 16.8\%$$

- Muestra 3

P1:2500 g

P2:2100 g

$$\% \text{pérdidas} = \frac{2500 - 2100}{2500} * 100$$

$$\text{pérdidas 3} = 16.0\%$$

Anexo E. Gravedad específica de los porcentajes de asfalto

- Muestra 4.5%

→ Muestra 1

Aal:1181 g

Bal: 576 g

$$G_{al} = \frac{1181}{1181 - 576}$$

$$G_{al} = 1.95$$

→ Muestra 2

Aal:1153 g

Bal:568 g

$$G_{al} = \frac{1153}{1153 - 568}$$

$$G_{al} = 1.97$$

→ Muestra 3

Aal:1175 g

Bal:571 g

$$G_{al} = \frac{1175}{1175 - 571}$$

$$G_{al} = 1.94$$

→ Promedio 4.5% de asfalto

$$G_{al} = \frac{1.95 + 1.97 + 1.94}{3}$$

$$G_{al} = 1.95$$

Por otra parte, para las muestras de 5% de asfalto se obtiene que:

- Muestra 5%

→ Muestra 1

Aal:1150 g

Bal: 538 g

$$G_{al} = \frac{1150}{1150 - 538}$$
$$G_{al} = 1.88$$

→ Muestra 2

Aal:1145 g

Bal:530 g

$$G_{al} = \frac{1145}{1145 - 530}$$
$$G_{al} = 1.86$$

→ Muestra 3

Aal:1152 g

Bal:539 g

$$G_{al} = \frac{1152}{1152 - 539}$$
$$G_{al} = 1.87$$

→ Promedio 5% de asfalto

$$G_{al} = \frac{1.88 + 1.86 + 1.87}{3}$$
$$G_{al} = 1.87$$

Por otra parte, se realiza la gravedad específica para unas muestras de 5.5%, así:

- Muestra 5.5%

→ Muestra 1

Aal:1236 g

Bal: 579 g

$$G_{al} = \frac{1236}{1236 - 579}$$

$$G_{al} = 1.88$$

→ Muestra 2

Aal:1235 g

Bal:578 g

$$G_{al} = \frac{1235}{1235 - 578}$$

$$G_{al} = 1.88$$

→ Muestra 3

Aal:1238 g

Bal:581 g

$$G_{al} = \frac{1238}{1238 - 581}$$

$$G_{al} = 1.88$$

→ Promedio 5.5% de asfalto

$$G_{al} = \frac{1.88 + 1.88 + 1.88}{3}$$

$$G_{al} = 1.88$$

Por último, se encuentra la gravedad específica para las 3 muestras de 6% de asfalto:

- Muestra 6%

→ Muestra 1

Aal:1249 g

Bal: 589 g

$$G_{al} = \frac{1249}{1249 - 589}$$

$$G_{al} = 1.89$$

→ Muestra 2

Aal:1253 g

Bal:594 g

$$G_{al} = \frac{1253}{1253 - 594}$$
$$G_{al} = 1.90$$

→ Muestra 3

Aal:1251 g

Bal:590 g

$$G_{al} = \frac{1251}{1251 - 590}$$
$$G_{al} = 1.89$$

→ Promedio 6% de asfalto

$$G_{al} = \frac{1.89 + 1.90 + 1.89}{3}$$
$$G_{al} = 1.89$$

Anexo F. Gravedad específica de la película de parafina

- Muestra 4.5%

→ Muestra 1

Aal: 1181 g

Dal: 1210g

Eal: 570 g

Gal: 1.95

$$F = \frac{1210 - 1181}{1210 - 570 - \frac{1181}{1.95}}$$

$$F = 0.84$$

→ Muestra 2

Aal: 1153 g

Dal: 1178 g

Eal: 565 g

Gal: 1.97

$$F = \frac{1178 - 1153}{1178 - 565 - \frac{1153}{1.97}}$$

$$F = 0.90$$

→ Muestra 3

Aal: 1175 g

Dal: 1199 g

Eal: 568 g

Gal: 1.94

$$F = \frac{1199 - 1175}{1199 - 568 - \frac{1175}{1.94}}$$

$$F = 0.85$$

→ Promedio 4.5% de asfalto

$$F = \frac{0.84 + 0.90 + 0.85}{3}$$

$$F = 0.86$$

Posteriormente para la muestra de 5%:

- Muestra 5%

→ Muestra 1

Aal: 1150 g

Dal: 1201 g

Eal: 540 g

Gal: 1.88

$$F = \frac{1201 - 1150}{1201 - 540 - \frac{1150}{1.88}}$$

$$F = 1.03$$

→ Muestra 2

Aal: 1145 g

Dal: 1197 g

Eal: 537 g

Gal: 1.86

$$F = \frac{1197 - 1145}{1197 - 537 - \frac{1145}{1.86}}$$

$$F = 1.26$$

→ Muestra 3

Aal: 1152 g

Dal: 1202g

Eal: 542 g

Gal: 187

$$F = \frac{1202 - 1152}{1202 - 542 - \frac{1152}{187}}$$
$$F = 1.14$$

→ Promedio 5% de asfalto

$$F = \frac{1.03 + 1.26 + 1.14}{3}$$
$$F = 1.14$$

Por otra parte, para el caso de las muestras con el porcentaje de 5.5%, la gravedad específica será de:

- Muestra 5.5%

→ Muestra 1

Aal:1236 g

Dal:1278 g

Eal:585g

Gal: 1.88

$$F = \frac{1278 - 1236}{1278 - 585 - \frac{1236}{1.88}}$$
$$F = 1.18$$

→ Muestra 2

Aal:1235 g

Dal:1281 g

Eal:582 g

Gal: 1.88

$$F = \frac{1281 - 1235}{1281 - 582 - \frac{1235}{1.88}}$$
$$F = 1.09$$

→ Muestra 3

Aal:1238 g

Dal:1284 g

Eal:587 g

Gal:1.88

$$F = \frac{1284 - 1238}{1284 - 587 - \frac{1238}{1.88}}$$

$$F = 1.20$$

→ Promedio 5.5% de asfalto

$$F = \frac{1.19 + 1.09 + 1.20}{3}$$

$$F = 1.16$$

Finalmente se encuentra la gravedad específica para el 6% de asfalto, como se muestra a continuación:

• Muestra 6%

→ Muestra 1

Aal:1249 g

Dal:1284 g

Eal:594 g

Gal:1.89

$$F = \frac{1284 - 1249}{1284 - 594 - \frac{1249}{1.89}}$$

$$F = 1.02$$

→ Muestra 2

Aal:1253 g

Dal:1288 g

Eal:597 g

Gal:1.90

$$F = \frac{1288 - 1253}{1288 - 597 - \frac{1253}{1.90}}$$
$$F = 1.11$$

→ Muestra 3

Aal:1251 g

Dal:1286 g

Eal:596 g

Gal:1.89

$$F = \frac{1286 - 1251}{1286 - 596 - \frac{1251}{1.89}}$$
$$F = 1.25$$

→ Promedio 6% de asfalto

$$F = \frac{1.02 + 1.11 + 1.25}{3}$$
$$F = 1.12$$

Anexo G. Gravedad específica bulk

- Muestra 4.5%

→ Muestra 1

A:1181 g

D:1210 g

E: 570

F: 0.84

$$Geb = \frac{1181}{1210 - 570 - \frac{1210 - 1181}{0.84}}$$

$$Geb = 1.95$$

→ Muestra 2

A:1153 g

D:1178 g

E:565

F:0.90

$$Geb = \frac{1153}{1178 - 565 - \frac{1178 - 1153}{0.90}}$$

$$Geb = 1.97$$

→ Muestra 3

A:1175 g

D:1199 g

E:568

F:0.85

$$Geb = \frac{1175}{1199 - 568 - \frac{1199 - 1175}{0.85}}$$

$$Geb = 1.95$$

→ Promedio 4.5% de asfalto

$$Geb = \frac{1.95 + 1.97 + 1.95}{3}$$

$$Geb = 1.96$$

● Muestra 5%

→ Muestra 1

A:1150 g

D:1201 g

E:540

F:1.03

$$Geb = \frac{1150}{1201 - 540 - \frac{1201 - 1150}{1.03}}$$

$$Geb = 1.88$$

→ Muestra 2

A:1145 g

D:1197 g

E:537

F:1.26

$$Geb = \frac{1145}{1197 - 537 - \frac{1197 - 1145}{1.26}}$$

$$Geb = 1.85$$

→ Muestra 3

A:1152

D:1202

E:542

F:1.14

$$Geb = \frac{1152}{1202 - 542 - \frac{1202 - 1152}{1.14}}$$

$$Geb = 1.87$$

→ Promedio 5% de asfalto

$$Geb = \frac{1.88 + 1.85 + 1.87}{3}$$
$$Geb = 1.87$$

• Muestra 5.5%

→ Muestra 1

A:1236 g

D:1278 g

E:585

F:1.18

$$Geb = \frac{1236}{1278 - 585 - \frac{1278 - 1236}{1.18}}$$
$$Geb = 1.88$$

→ Muestra 2

A:1235 g

D:1231 g

E:582

F:1.09

$$Geb = \frac{1235}{1231 - 582 - \frac{1231 - 1235}{1.09}}$$
$$Geb = 1.89$$

→ Muestra 3

A:1238 g

D:1284 g

E:587

F:1.20

$$Geb = \frac{1238}{1284 - 587 - \frac{1284 - 1238}{1.20}}$$
$$Geb = 1.88$$

→ Promedio 5.5% de asfalto

$$Geb = \frac{1.88 + 1.89 + 1.88}{3}$$
$$Geb = 1.88$$

- Muestra 6%

→ Muestra 1

A:1249 g

D:1284 g

E: 594

F:1.02

$$Geb = \frac{1249}{1284 - 594 - \frac{1284 - 1249}{1.02}}$$
$$Geb = 1.90$$

→ Muestra 2

A:1253 g

D:1288 g

E:597

F:1.11

$$Geb = \frac{1253}{1288 - 597 - \frac{1288 - 1253}{1.11}}$$
$$Geb = 1.90$$

→ Muestra 3

A:1251 g

D:1286 g

E:596

F:1.25

$$Geb = \frac{1251}{1286 - 596 - \frac{1286 - 1251}{1.25}}$$
$$Geb = 1.89$$

→ Promedio 6% de asfalto

$$Geb = \frac{1.90 + 1.90 + 1.89}{3}$$
$$Geb = 1.90$$

Anexo H. Densidad

- Muestra 4.5%

→ Muestra 1

Geb: 1.95

$$D = 1.95 * 0.9970$$

$$D = 1.94$$

→ Muestra 2

Geb: 1.97

$$D = 1.97 * 0.9970$$

$$D = 1.96$$

→ Muestra 3

Geb: 1.96

$$D = 1.96 * 0.9970$$

$$D = 1.95$$

→ Promedio 4.5% de asfalto

$$D = \frac{1.94 + 1.96 + 1.95}{3}$$

$$D = 1.95$$

- Muestra 5%

→ Muestra 1

Geb: 1.88

$$D = 1.88 * 0.9970$$

$$D = 1.87$$

→ Muestra 2

Geb: 1.85

$$D = 1.85 * 0.9970$$

$$D = 1.84$$

→ Muestra 3

Geb: 1.87

$$D = 1.87 * 0.9970$$

$$D = 1.86$$

→ Promedio 5% de asfalto

$$D = \frac{1.87 + 1.84 + 1.86}{3}$$

$$D = 1.86$$

● Muestra 5.5%

→ Muestra 1

Geb: 1.88

$$D = 1.88 * 0.9970$$

$$D = 1.87$$

→ Muestra 2

Geb: 1.89

$$D = 1.89 * 0.9970$$

$$D = 1.88$$

→ Muestra 3

Geb: 1.88

$$D = 1.88 * 0.9970$$

$$D = 1.87$$

→ Promedio 5.5% de asfalto

$$D = \frac{1.87 + 1.88 + 1.87}{3}$$
$$D = 1.87$$

- Muestra 6%

→ Muestra 1

Geb: 1.90

$$D = 1.90 * 0.9970$$
$$D = 1.89$$

→ Muestra 2

Geb: 1.90

$$D = 1.90 * 0.9970$$
$$D = 1.89$$

→ Muestra 3

Geb: 1.89

$$D = 1.89 * 0.9970$$
$$D = 1.88$$

→ Promedio 6% de asfalto

$$D = \frac{1.89 + 1.89 + 1.88}{3}$$
$$D = 1.89$$

Anexo I. Gravedad específica máxima

- Muestra 4.5%

$$Gmm = \frac{100}{\frac{75\%}{2.39} + \frac{25\%}{1.81} + \frac{4.5\%}{1.96}}$$
$$Gmm = 2.11$$

- Muestra 5%

$$Gmm = \frac{100}{\frac{75\%}{2.39} + \frac{25\%}{1.81} + \frac{5\%}{1.87}}$$
$$Gmm = 2.09$$

- Muestra 5.5%

$$Gmm = \frac{100}{\frac{75\%}{2.39} + \frac{25\%}{1.81} + \frac{5.5\%}{1.88}}$$
$$Gmm = 2.08$$

- Muestra 6%

$$Gmm = \frac{100}{\frac{75\%}{2.39} + \frac{25\%}{1.81} + \frac{6\%}{1.90}}$$
$$Gmm = 2.07$$

Anexo J. Porcentaje de vacíos

- Muestra 4.5%

Gmb: 1.96

Gmm: 2.11

$$VA = \left(1 - \frac{1.96}{2.11}\right) * 100$$

$$VA = 7.11 \%$$

- Muestra 5%

Gmb: 1.87

Gmm: 2.09

$$VA = \left(1 - \frac{1.87}{2.09}\right) * 100$$

$$VA = 10.52 \%$$

- Muestra 5.5%

Gmb: 1.88

Gmm: 2.08

$$VA = \left(1 - \frac{1.88}{2.08}\right) * 100$$

$$VA = 9.61 \%$$

- Muestra 6%

Gmb: 1.90

Gmm: 2.07

$$VA = \left(1 - \frac{1.90}{2.07}\right) * 100$$

$$VA = 8.21 \%$$

Anexo K. Adhesividad mezcla convencional

- **Adhesividad mezcla convencional**

Los datos obtenidos durante el ensayo fueron:

→ Muestra 1

P1: g

P2: g

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

$$P = \%$$

→ Muestra 2

P1: g

P2: g

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

$$P = \%$$

→ Muestra 3

P1: g

P2: g

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

$$P = \%$$

Anexo L. Adhesividad mezcla modificada

- Adhesividad mezcla modificada al 70%

→ Muestra 1 de 70%

P1: 931g

P2: 170g

$$P = \frac{931 - 170}{931} * 100$$

$$P = 82\%$$

→ Muestra 2 de 70%

P1: 940 g

P2: 217 g

$$P = \frac{940 - 217}{940} * 100$$

$$P = 77\%$$

→ Muestra 3 de 70%

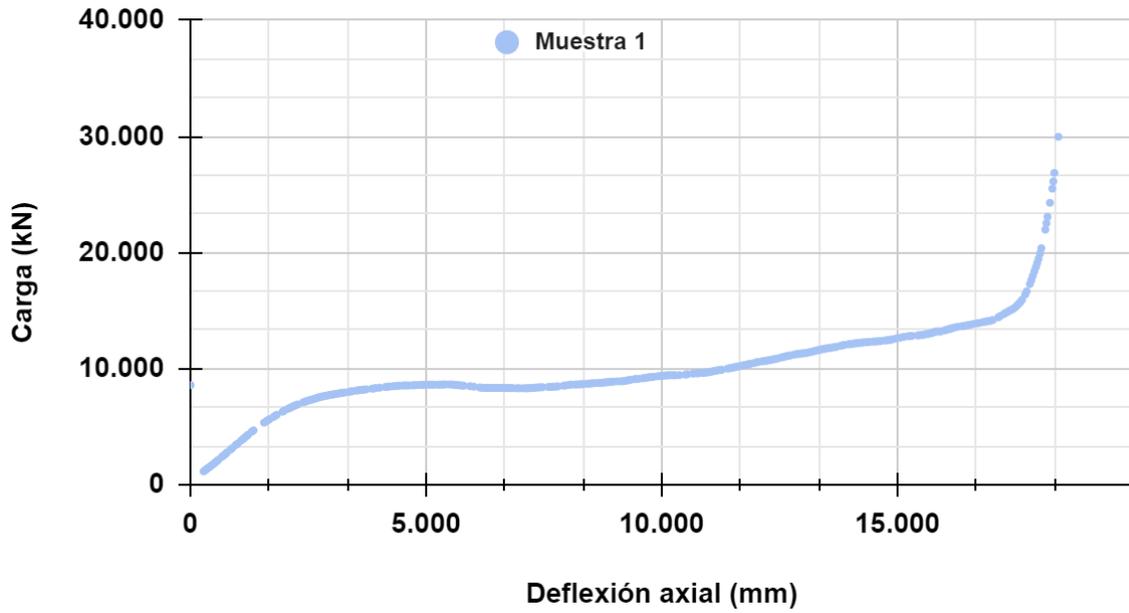
P1: 935g

P2: 185g

$$P = \frac{935 - 185}{935} * 100$$

$$P = 80\%$$

Adhesividad de mezcla modificada al 70%



- Adhesividad mezcla modificada al 50%

→ Muestra 1 de 50%

P1: 1083 g

P2: 408 g

$$P = \frac{1083 - 408}{1083} * 100$$
$$P = 62\%$$

→ Muestra 2 de 50%

P1: 1086 g

P2: 432g

$$P = \frac{1086 - 432}{1086} * 100$$
$$P = 60\%$$

→ Muestra 3 de 50%

P1: 1084 g

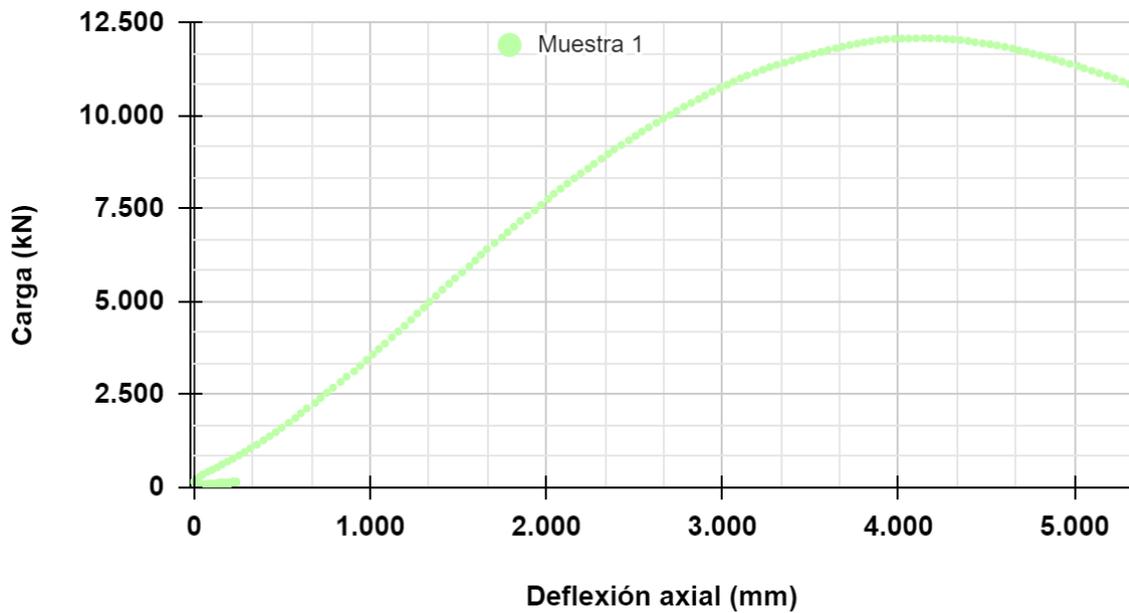
P2: 420g

$$P = \frac{1084 - 420}{1084} * 100$$
$$P = 61\%$$

→ Promedio de adhesividad para el 50%

$$P = \frac{62 + 60 + 61}{3}$$
$$P = 61\%$$

Adhesividad de mezcla modificada al 50%



- Adhesividad mezcla modificada al 30%

→ Muestra 1 de 30%

P1: 1100 g

P2: 344g

$$P = \frac{1100 - 344}{1100} * 100$$
$$P = 69 \%$$

→ Muestra 2 de 30%

P1: 1098 g

P2: 354 g

$$P = \frac{1098 - 354}{1098} * 100$$
$$P = 68 \%$$

→ Muestra 3 de 30%

P1: 1112 g

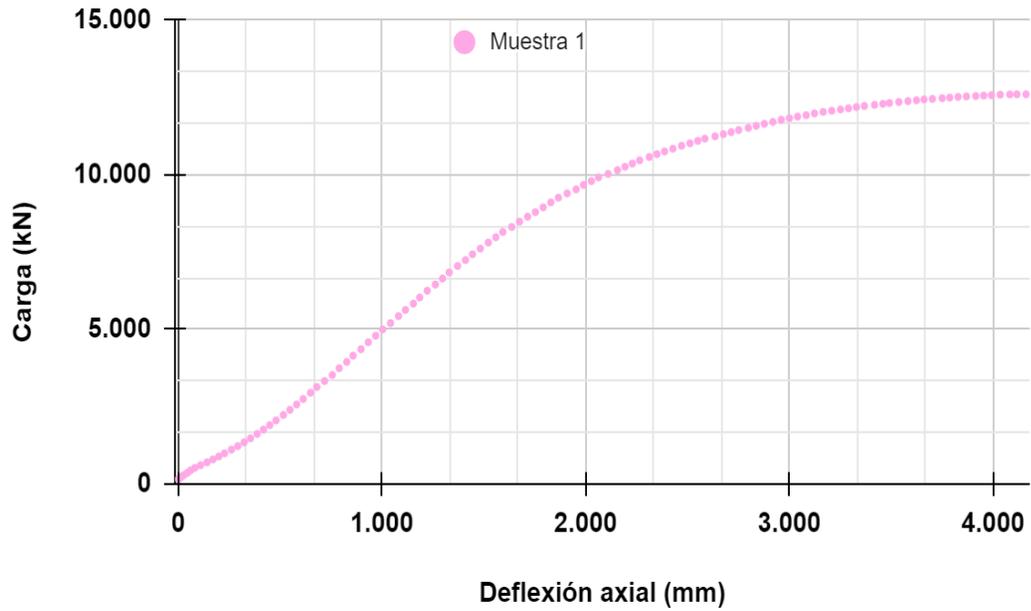
P2: 387 g

$$P = \frac{1112 - 387}{1112} * 100$$
$$P = 65 \%$$

→ Promedio de adhesividad para el 30%

$$P = \frac{69 + 68 + 65}{3}$$
$$P = 67 \%$$

Adhesividad de mezcla modificada al 30%



- Adhesividad mezcla modificada al 20%

→ Muestra 1 de 20%

P1: 1125 g

P2: 596 g

$$P = \frac{1125 - 596}{1125} * 100$$

$$P = 47\%$$

→ Muestra 2 de 20%

P1: 1116 g

P2: 568 g

$$P = \frac{1116 - 568}{1116} * 100$$

$$P = 49\%$$

→ Muestra 3 de 20%

P1: 1128g

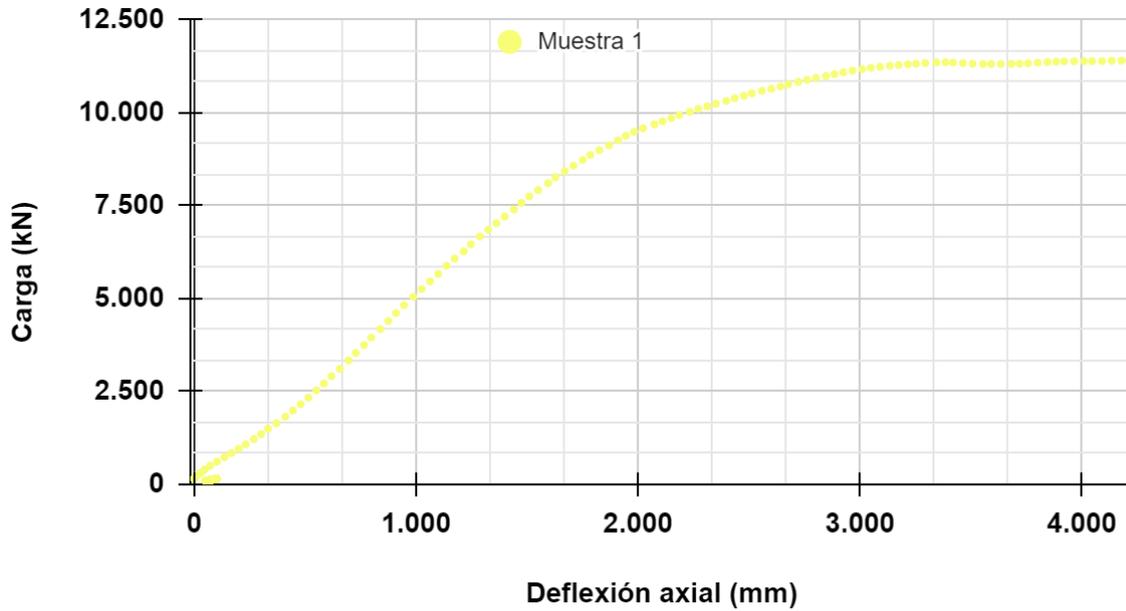
P2: 603 g

$$P = \frac{1128 - 603}{1128} * 100$$
$$P = 47\%$$

→ Promedio de adhesividad para el 20%

$$P = \frac{47 + 49 + 47}{3}$$
$$P = 48\%$$

Adhesividad de mezcla modificada al 20%



- Adhesividad mezcla modificada al 10%

→ Muestra 1 de 10%

P1:1135 g

P2: 799 g

$$P = \frac{1135 - 799}{1135} * 100$$

$$P = 30 \%$$

→ Muestra 2 de 10%

P1:1131 g

P2: 792 g

$$P = \frac{1131 - 792}{1131} * 100$$

$$P = 30\%$$

→ Muestra 3 de 10%

P1:1132 g

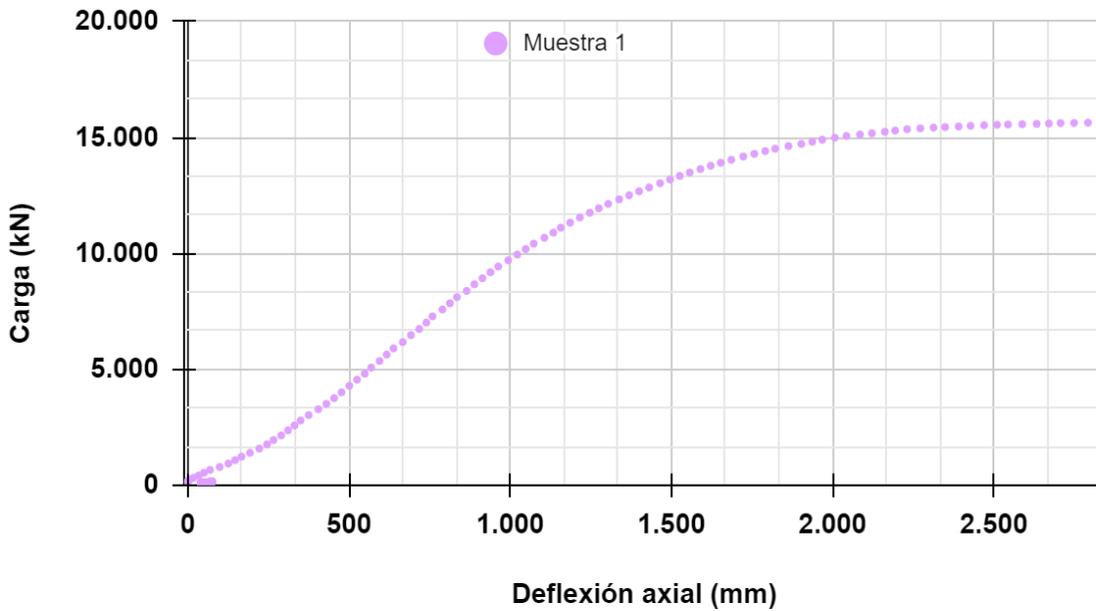
P2: 790g

$$P = \frac{1132 - 790}{1132} * 100$$
$$P = 30\%$$

→ Promedio de adhesividad para el 10%

$$P = \frac{30 + 30 + 30}{3}$$
$$P = 30\%$$

Adhesividad de mezcla modificada al 10%



Anexo M. Permeabilidad mezcla modificada

Permeabilidad para 70%

Espécimen	70%	70%	70%
Tiempo empleado	8s	7,68s	7,64s

Promedio de tiempo para 70%:

$$Tiempo = \frac{8 + 7,68 + 7,64}{3}$$

$$Tiempo = 7,77 s$$

Permeabilidad para 50%

Espécimen	50%	50%	50%
Tiempo empleado	8s	8,28s	8,22s

Promedio de tiempo para 50%:

$$Tiempo = \frac{8 + 8,28 + 8,22}{3}$$

$$Tiempo = 8,17s$$

Permeabilidad para 30%

Espécimen	30%	30%	30%
Tiempo empleado	10,75s	10,63s	10,60s

Promedio de tiempo para 30%:

$$Tiempo = \frac{10.75 + 10.63 + 10.60}{3}$$

$$Tiempo = 10.66s$$

Permeabilidad para 20%

Espécimen	20%	20%	20%
Tiempo empleado	11,68s	12,65s	11,33s

Promedio de tiempo para 20%:

$$Tiempo = \frac{11.68 + 12.65 + 11.33}{3}$$

$$Tiempo = 11.89s$$

Permeabilidad para 10%

Espécimen	10%	10%	10%
Tiempo empleado	13,59s	13,68s	14,32s

Promedio de tiempo para 10%:

$$Tiempo = \frac{13.59 + 13.68 + 14.32}{3}$$

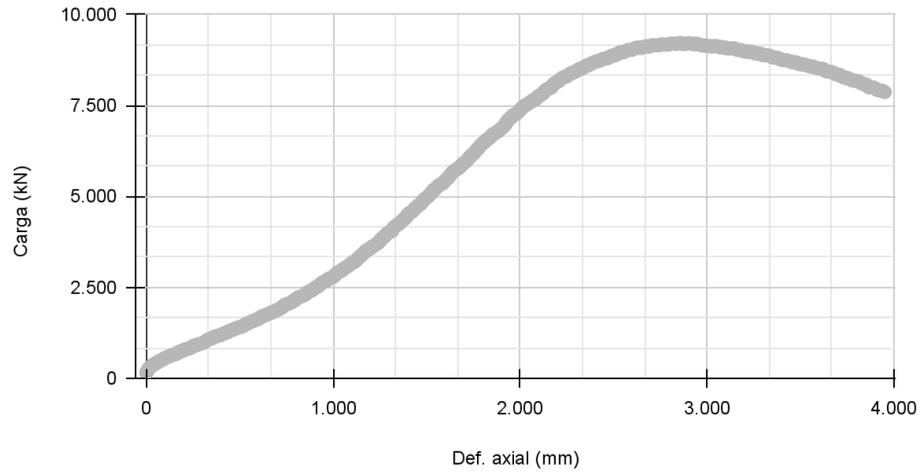
$$Tiempo = 13.86s$$

Anexo N. Ensayo de compresión mezcla modificada

Ensayo de compresión simple al 70%

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (MPa)
1	9.21	1.131

Deflexión axial al 70%

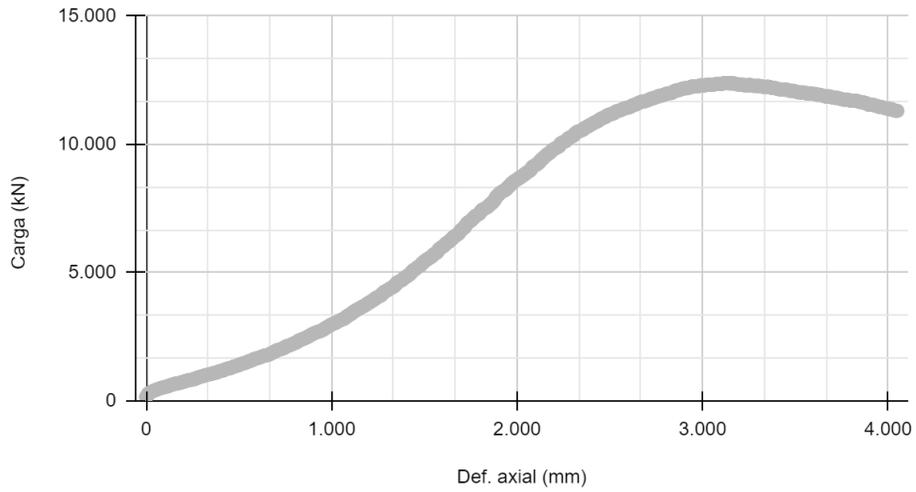


Lo que deja ver muy en claro que a 9.21 kN la deflexión axial es de 2.85mm.

Ensayo de compresión simple 50%

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (Mpa)
1	12.39	1.52

Deflexión axial en 50 %

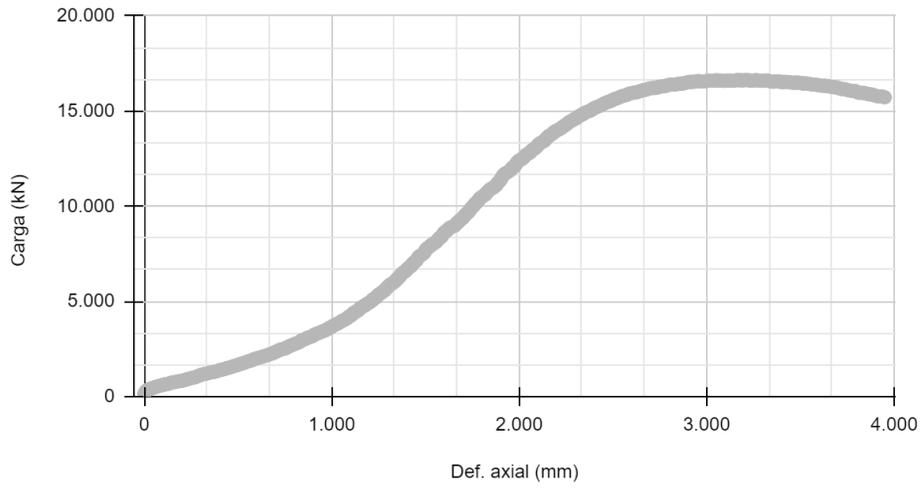


Esto nos indica claramente que cuando la carga alcanza los 12.39 kN, la deflexión axial medida es de 3.12 mm.

Ensayo de compresión simple 30%

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (Mpa)
1	16.63	2.03

Deflexión axial al 30 %

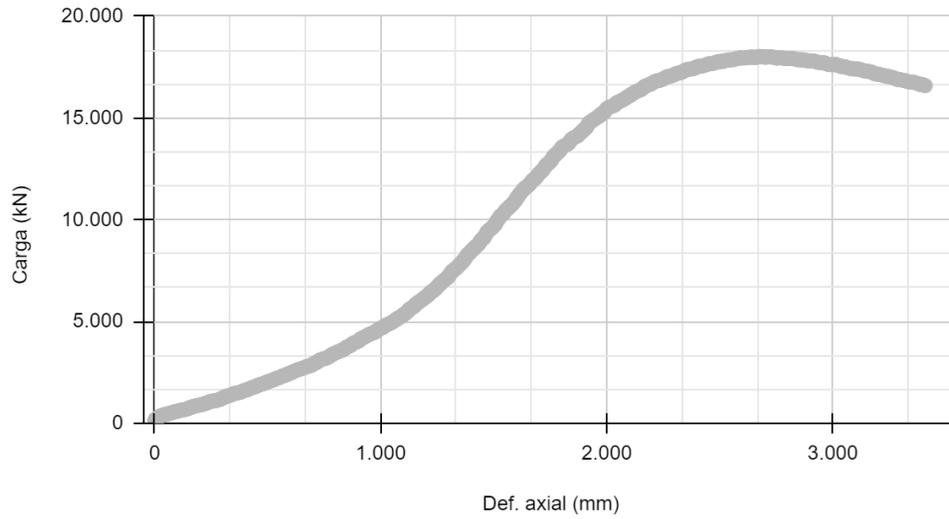


Esto claramente indica que cuando la carga alcanza los 16.62 kN, la deflexión axial es de 3.17 mm.

Ensayo de compresión simple 20%

Muestra	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (Mpa)
1	18.05	2.21

Deflexión axial al 20 %

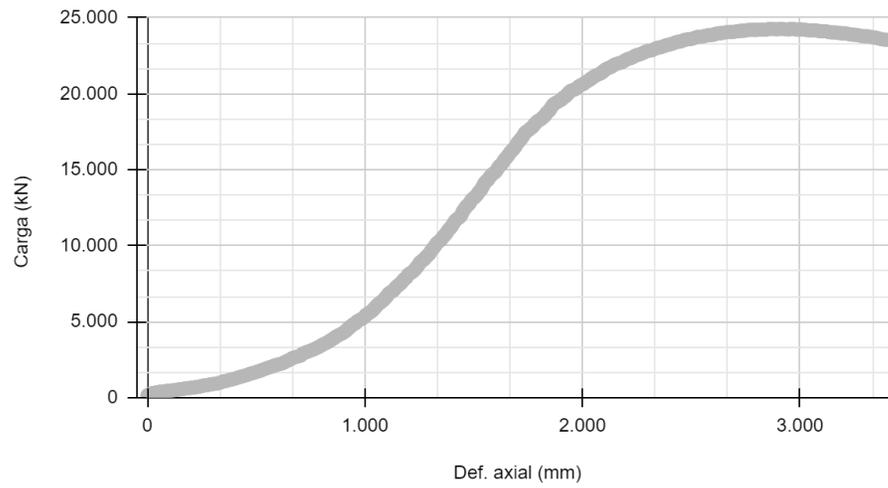


Este gráfico permite analizar entonces que cuando la carga alcanza los 18.05 kN, la deflexión axial es de 2.67 mm.

Ensayo de compresión simple 10%

Muestr a	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (Mpa)
1	24.26	2.95

Deflexión axial al 10 %



Finalmente, este gráfico nos permite analizar entonces que cuando la carga alcanza los 24.26 kN, la deflexión axial es de 2.86 mm.

Anexo O. APU mezcla convencional**APU mezcla convencional**

	Materiales	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Grava	Kg	0,420	\$120	\$50
2	Arena	Kg	0,780	\$120	\$94
3	Ligante Asfáltico 60-70	Kg	0,060	\$5.284	\$317
Subtotal De Materiales					\$461

Item	Mano De Obra	Unidad	Rendimiento	Valor/Hora	Horas	Valor Total
1	Cuadrilla 0-1-2 (1 Oficial - 2 Obreros)	Hora	89%	\$29.900	3	\$79.833
Subtotal De Mano De Obra						\$79.833

Item	Transporte	Unidad	Distancia	Valor Unitario	Valor Total
1	Transporte De Asfalto	Km/Gal	4,2	\$450	\$1.890
2	Transporte De Arena	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
3	Transporte De Grava	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
Subtotal Transporte					\$6.750

Item	Equipos Y Herramienta	Unidad	Rendimiento	Valor Unitario	Horas	Valor Total
	Herramienta					
1	Menor (Gato - Estufa - Balanza)	Hora	10%	\$3.500	0,67	\$235
2	Horno	Hora	10%	\$17.900	1	\$1.790
3	Tamizadora	Hora	10%		0,5	\$0
	Martillo De					
4	Compactación Marshall	Hora	10%		0,5	\$0
Subtotal Equipo Y Herramienta						\$2.025
Costo Directo						\$89.069
Costo Por 6 Briquetas Convencionales						\$534.411

Anexo P. APU mezcla modificada**APU mezcla modificada al 70 %**

	Materiales	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Grava	Kg	0,252	\$120	\$30
2	Arena	Kg	0,780	\$120	\$94
3	Ligante Asfáltico 60-70	Kg	0,060	\$5.284	\$317
Subtotal De Materiales					\$441

Item	Mano De Obra	Unidad	Rendimiento	Valor/Hora	Horas	Valor Total
1	Cuadrilla 0-1-2 (1 Oficial - 2 Obreros)	Hora	89%	\$29.900	3	\$79.833
Subtotal De Mano De Obra						\$79.833

Item	Transporte	Unidad	Distancia	Valor Unitario	Valor Total
1	Transporte De Asfalto	Km/Gal	4,2	\$450	\$1.890
2	Transporte De Arena	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
3	Transporte De Grava y PET	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
Subtotal Transporte					\$6.750

Item	Equipos Y Herramienta	Unidad	Rendimiento	Valor Unitario	Horas	Valor Total
	Herramienta					
1	Menor (Gato - Estufa - Balanza)	Hora	10%	\$3.500	0,67	\$235
2	Horno	Hora	10%	\$17.900	1	\$1.790
3	Tamizadora	Hora	10%		0,5	\$0
	Martillo De					
4	Compactación Marshall	Hora	10%		0,5	\$0
Subtotal Equipo Y Herramienta						\$2.025
Costo Directo						\$89.048
Costo Por 6 Briquetas Convencionales						\$534.290

APU mezcla modificada al 50 %

	Materiales	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Grava	Kg	0,300	\$120	\$36
2	Arena	Kg	0,780	\$120	\$94
3	Ligante Asfáltico 60-70	Kg	0,060	\$5.284	\$317
Subtotal De Materiales					\$447

Item	Mano De Obra	Unidad	Rendimiento	Valor/Hora	Horas	Valor Total
1	Cuadrilla 0-1-2 (1 Oficial - 2 Obreros)	Hora	89%	\$29.900	3	\$7 9.833
				Subtotal De Mano De Obra		\$7 9.833

Item	Transporte	Unidad	Distancia	Valor Unitario	Valor Total	
1	Transporte De Asfalto	Km/Gal	4,2	\$450	\$1.890	
2	Transporte De Arena	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430	
3	Transporte De Grava y PET	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430	
				Subtotal Transporte		\$6.750

Item	Equipos Y Herramienta	Unidad	Rendimiento	Valor Unitario	Horas	Valor Total
1	Herramienta Menor (Gato - Estufa - Balanza)	Hora	10%	\$3.500	0,67	\$2 35
2	Horno	Hora	10%	\$17.900	1	\$1 .790
3	Tamizadora	Hora	10%		0,5	\$0
4	Martillo De	Hora	10%		0,5	\$0

Compactación Marshall	
Subtotal Equipo Y Herramienta	\$2.025
<hr/>	
Costo Directo	\$8.9054
<hr/>	
\$5	
Costo Por 6 Briquetas Convencionales	
34.325	

APU mezcla modificada al 30 %

	Materiales	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Grava	Kg	0,348	\$120	\$42
2	Arena	Kg	0,780	\$120	\$94
3	Ligante Asfáltico 60-70	Kg	0,060	\$5.284	\$317
Subtotal De Materiales					\$452

Item	Mano De Obra	Unidad	Rendimiento	Valor/Hora	Horas	Valor Total
1	Cuadrilla 0-1-2 (1 Oficial - 2 Obreros)	Hora	89%	\$29.900	3	\$79.833
Subtotal De Mano De Obra						\$79.833

Item	Transporte	Unidad	Distancia	Valor Unitario	Valor Total
1	Transporte De Asfalto	Km/Gal	4,2	\$450	\$1.890
2	Transporte De Arena	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
3	Transporte De Grava y PET	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
Subtotal Transporte					\$6.750

Item	Equipos Y Herramienta	Unidad	Rendimiento	Valor Unitario	Horas	Valor Total
1	Herramienta Menor (Gato - Estufa - Balanza)	Hora	10%	\$3.500	0,67	\$235
2	Horno	Hora	10%	\$17.900	1	\$1.790
3	Tamizadora	Hora	10%		0,5	\$0
4	Martillo De Compactación Marshall	Hora	10%		0,5	\$0
Subtotal Equipo Y Herramienta						\$2.025
Costo Directo						\$89.060
Costo Por 6 Briquetas Convencionales						\$534.359

APU mezcla modificada al 20 %

	Materiales	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Grava	Kg	0,372	\$120	\$45
2	Arena	Kg	0,780	\$120	\$94
3	Ligante Asfáltico 60-70	Kg	0,060	\$5.284	\$317
Subtotal De Materiales					\$455

Item	Mano De Obra	Unidad	Rendimiento	Valor/Hora	Horas	Valor Total
1	Cuadrilla 0-1-2 (1 Oficial - 2 Obreros)	Hora	89%	\$29.900	3	\$79.833
Subtotal De Mano De Obra						\$79.833

Item	Transporte	Unidad	Distancia	Valor Unitario	Valor Total
1	Transporte De Asfalto	Km/Gal	4,2	\$450	\$1.890
2	Transporte De Arena	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
3	Transporte De Grava y PET	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430
Subtotal Transporte					\$6.750

Item	Equipos Y Herramienta	Unidad	Rendimiento	Valor Unitario	Horas	Valor Total
	Herramienta					
1	Menor (Gato - Estufa - Balanza)	Hora	10%	\$3.500	0,67	\$235
2	Horno	Hora	10%	\$17.900	1	\$1.790
3	Tamizadora	Hora	10%		0,5	\$0
	Martillo De					
4	Compactación Marshall	Hora	10%		0,5	\$0
Subtotal Equipo Y Herramienta						\$2.025
Costo Directo						\$89.063
Costo Por 6 Briquetas Convencionales						\$534.377

APU mezcla modificada al 10 %

	Materiales	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
1	Grava	Kg	0,396	\$120	\$48
2	Arena	Kg	0,780	\$120	\$94
3	Ligante Asfáltico 60-70	Kg	0,060	\$5.284	\$317
Subtotal De Materiales					\$458

Item	Mano De Obra	Unidad	Rendimiento	Valor/Hora	Horas	Valor Total
------	--------------	--------	-------------	------------	-------	-------------

1	Cuadrilla 0-1-2 (1 Oficial - 2 Obreros)	Hora	89%	\$29.900	3	\$79.833
					Subtotal De Mano De Obra	
					\$79.833	

Item	Transporte	Unidad	Distancia	Valor Unitario	Valor Total	
1	Transporte De Asfalto	Km/Gal	4,2	\$450	\$1.890	
2	Transporte De Arena	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430	
3	Transporte De Grava y PET	Km/Gal	5,4	\$450	\$2.430	
					Subtotal Transporte	
					\$6.750	

Item	Equipos Y Herramienta	Unidad	Rendimiento	Valor Unitario	Horas	Valor Total
1	Herramienta Menor (Gato - Estufa - Balanza)	Hora	10%	\$3.500	0,67	\$235
2	Horno	Hora	10%	\$17.900	1	\$1.790
3	Tamizadora	Hora	10%		0,5	\$0
4	Martillo De Compactación Marshall	Hora	10%		0,5	\$0
					Subtotal Equipo Y Herramienta	
					\$2.025	

					Costo Directo	
					\$89.066	
					Costo Por 6 Briquetas Convencionales	
					\$534.394	

Anexo Q. Exploración en costos de producción de briqueta convencional y modificada

Costo mezcla convencional

Ite m	Descripción	Unidad	Cantid ad	Valor unitario	Valor total
1	MDC-19 con ligante asfáltico 60-70	m3	6	\$89.069	\$534.411
Subtotal					\$534.411
Total, costos directos de obra					\$534.411
Total, costos indirectos de obra					
Administración			20%	\$106.882	
Utilidad			5%	\$26.721	
Imprevistos			5%	\$26.721	
Total, costos indirectos de obra					\$160.323
TOTAL DE LA OBRA					\$694.735

Costo mezcla modificada 70%

Ite m	Descripción	Unidad	Cantid ad	Valor unitario	Valor total
1	MDC-19 con ligante asfáltico 60-70 (70%)	m3	6	\$89.048	\$534.290
Subtotal					\$534.290
Total, costos directos de obra					\$534.290
Total, costos indirectos de obra					
Administración			20%	\$106.882	
Utilidad			5%	\$26.721	
Imprevistos			5%	\$26.721	
Total, costos indirectos de obra					\$160.323
TOTAL DE LA OBRA					\$694.614

Costo mezcla modificada 50 %

Ite m	Descripción	Unidad	Cantid ad	Valor unitario	Valor total
1	MDC-19 con ligante asfáltico 60-70 (50%)	m3	6	\$89.054	\$534.325
Subtotal					\$534.325
Total, costos directos de obra					\$534.325
Total, costos indirectos de obra					
Administración			20%	\$106.882	
Utilidad			5%	\$26.721	
Imprevistos			5%	\$26.721	
Total, costos indirectos de obra					\$160.323
TOTAL DE LA OBRA					\$694.648

Costo mezcla modificada 30%

Ite m	Descripción	Unidad	Cantid ad	Valor unitario	Valor total
1	MDC-19 con ligante asfáltico 60-70 (30%)	m3	6	\$89.060	\$534.359
Subtotal					\$534.359
Total, costos directos de obra					\$534.359
Total, costos indirectos de obra					
Administración			20%	\$106.882	
Utilidad			5%	\$26.721	
Imprevistos			5%	\$26.721	
Total, costos indirectos de obra					\$160.323
TOTAL DE LA OBRA					\$694.683

Costo mezcla modificada 20%

Ite m	Descripción	Unidad	Cantid ad	Valor unitario	Valor total
1	MDC-19 con ligante asfáltico 60-70 (20%)	m3	6	\$89.063	\$534.377
Subtotal					\$534.377
Total, costos directos de obra					\$534.377
Total, costos indirectos de obra					
Administración			20%	\$106.882	
Utilidad			5%	\$26.721	
Imprevistos			5%	\$26.721	
Total, costos indirectos de obra					\$160.323
TOTAL DE LA OBRA					\$694.700

Costo mezcla modificada 10%

Ite m	Descripción	Unidad	Cantid ad	Valor unitario	Valor total
1	MDC-19 con ligante asfáltico 60-70 (10%)	m3	6	\$89.066	\$534.394
Subtotal					\$534.394
Total, costos directos de obra					\$534.394
Total, costos indirectos de obra					
Administración			20%	\$106.882	
Utilidad			5%	\$26.721	
Imprevistos			5%	\$26.721	
Total, costos indirectos de obra					\$160.323
TOTAL DE LA OBRA					\$694.717