

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON  
ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO**

**CARMENZA GÓMEZ AVELLANEDA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
TUNJA  
2019**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON  
ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO**

**CARMENZA GÓMEZ AVELLANEDA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
MÁGISTER EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS  
EN INFRAESTRUCTURA VIAL**

**Director  
Ing. PhD. RICARDO OCHOA DÍAZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
TUNJA  
2019**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, noviembre de 2019

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación.

Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

## **DEDICATORIA**

A Dios todopoderoso por estar siempre a mi lado.

A mi hijo William Alejandro, eres el mejor regalo de Dios.

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora expresa su agradecimiento a:

A Dios, por las oportunidades de crecimiento y desarrollo personal brindado hasta el momento.

Al Ingeniero PhD. Ricardo Ochoa Díaz, director de este trabajo, por toda su colaboración y aporte durante el desarrollo de la investigación.

Al Ingeniero Manuel Sierra Arciniegas, coordinador del laboratorio de pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Por toda su colaboración en la realización de ensayos de laboratorio.

A las empresas Gerdau Diaco Tuta, La Roca y Manufacturas y Procesos Industriales MPI, por el aporte de materiales de investigación.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	20
1. GENERALIDADES .....	21
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	21
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
1.2.1 Objetivo General .....	23
1.2.2 Objetivos Específicos.....	23
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	24
1.4 METODOLOGÍA .....	25
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	27
2.1 INTRODUCCIÓN .....	27
2.2 UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	27
2.3 ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	29
2.3.1 A nivel internacional.....	31
2.3.2 A nivel nacional.....	34
2.4 ESCORIAS .....	35
2.4.1 Escorias siderúrgicas .....	35
2.4.2 Horno de arco eléctrico .....	37
2.5 PROCESO SIDERÚRGICO.....	43
2.5.1 Historia del acero en Colombia .....	44
2.5.2 Proceso siderúrgico en Colombia .....	45
2.5.3 Gerdau-Diaco S.A.....	45
2.6 MATERIALES PARA CONCRETOS ASFÁLTICOS .....	45
2.6.1 Mezclas asfálticas.....	45
2.6.2 Concretos asfálticos.....	46
2.6.3 Cementos asfálticos.....	46
2.6.4 Agregados pétreos.....	48
2.7 METODOLOGÍA RAMCODES.....	53
2.7.1 Ramcodes en mezclas asfálticas.....	54

2.7.2 Información necesaria para construir el polígono de vacíos .....	55
2.7.3 Polígono de vacíos .....	59
2.8. PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	62
2.8.1 Susceptibilidad al daño por la humedad .....	62
2.8.2 Resistencia a la deformación plástica o ahuellamiento.....	64
2.8.3 Leyes de fatiga.....	67
2.8.4 Módulo resiliente.....	71
3. ENSAYOS Y RESULTADOS.....	76
3.1 INTRODUCCIÓN.....	76
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	76
3.2.1 Localización de las fuentes.....	76
3.2.2 Resultados de la caracterización de los agregados.....	80
3.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	85
3.3.1 Diseño experimental .....	86
3.3.2 Definición de la franja granulométrica.....	86
3.3.3 Combinaciones y especificaciones .....	87
3.3.4 Cálculo de los parámetros gravimétricos .....	88
3.3.5 Cálculo de las gravedades específicas.....	88
3.3.6 Verificación $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ .....	88
3.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RAMCODES.....	89
3.4.1 Determinación del polígono de vacíos y obtención del contenido óptimo de asfalto.....	89
3.4.2 Polígono de vacíos M-1 .....	89
3.4.3 Polígono de vacíos M-2 .....	94
3.4.4 Polígono de vacíos M-3 .....	99
3.4.5 Ensayo de estabilidad y flujo .....	104
3.5 PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICA.....	108
3.5.1 Susceptibilidad a la humedad .....	108
3.5.2 Resistencia a la deformación plástica.....	112
3.5.3 Leyes de fatiga.....	116



3.5.4 Módulo resiliente .....	118
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	121
4.1 INTRODUCCIÓN .....	121
4.2 ANÁLISIS DE ENSAYOS Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO .....	121
4.2.1 Porcentaje óptimo de asfalto.....	121
4.2.2 Estabilidad .....	122
4.2.3 Flujo .....	122
4.2.4 Vacíos de aire .....	123
4.2.5 Vacíos del agregado mineral .....	124
4.2.6 Vacíos llenos de asfalto .....	124
4.2.7 Susceptibilidad a la humedad .....	125
4.2.8 Resistencia a la deformación plástica.....	125
4.2.9 Leyes de fatiga .....	127
4.2.10 Módulo resiliente.....	129
4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	130
4.4 ANÁLISIS AMBIENTAL .....	131
5. CONCLUSIONES .....	133
6. RECOMENDACIONES.....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	140
ANEXOS	

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas de las escorias EAF .....	39
Tabla 2. Composición química de la escoria según diferentes autores .....	40
Tabla 3. Composición mineralógica, constituyentes cristalinos. ....	41
Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico.....	48
Tabla 5 Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua MDC-19. ....	50
Tabla 6. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continúa.....	50
Tabla 7. Factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas.....	67
Tabla 8.Constantes para calcular el módulo resiliente y la relación de Poisson ....	77
Tabla 9. Resultados de la caracterización del agregado pétreo (grava) .....	82
Tabla 10.Resultados de las densidades del agregado pétreo (grava) .....	83
Tabla 11. Resultados obtenidos para el agregado siderúrgico (escoria negra). Promedio de los 3 ensayos.....	83
Tabla 12.Resultados promedio de densidades de agregados siderúrgico EAF de los 3 ensayos y su promedio.....	83
Tabla 13. Resultados de las densidades del agregado escoria EAF .....	84
Tabla 14. Resultados de la caracterización de agregados siderúrgico EAF .....	84
Tabla 15. Composición química de la escoria (EAF) es la siguiente .....	85
Tabla 16. Resultados de la caracterización agregado fino (arena).....	85
Tabla 17. Resultados de la caracterización agregado fino (arena) .....	85
Tabla 18.Tabla para la determinación AC 60-70 según NT3 y Temperatura de la ciudad de Tunja.....	86
Tabla 19. Resultados caracterización cemento asfáltico AC 60 /70 .....	86
Tabla 20. Franjas granulométricas para la mezcla densa en caliente MDC-19 .....	88
Tabla 21. Gradación del agregado para las mezclas base .....	88
Tabla 22. Resultados de los ensayos de gravedad específica en los materiales ..	90

Tabla 23. Datos para el cálculo de gravedad especifican efectiva.....	90
Tabla 24. Resultados y verificación $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ .....	90
Tabla 25. Criterios para el control de vacíos en mezclas asfálticas con NT3 .....	91
Tabla 26. Datos para determinar el polígono de vacíos de la Mezcla 1.....	91
Tabla 27. Valores para la franja de vacíos con aire ( $V_a$ ), mezcla 1.....	92
Tabla 28. Valores para la franja de vacíos del agregado mineral, mezcla 1.....	93
Tabla 29. Valores para la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA), mezcla1 .....	94
Tabla 30. Cálculo del centroide para el polígono de vacíos de la mezcla 1.....	95
Tabla 31. Datos para determinar el polígono de vacíos de la Mezcla 2.....	96
Tabla 32. Valores para la franja de vacíos con aire ( $V_a$ ), mezcla 2.....	97
Tabla 33. Valores para la franja de vacíos del agregado mineral, mezcla 2.....	98
Tabla 34. Valores para la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA), mezcla 2 .....	99
Tabla 35. Cálculo del centroide para el polígono de vacíos de la mezcla 2.....	101
Tabla 36. Datos para determinar el polígono de vacíos de la Mezcla 3.....	101
Tabla 37. Valores para la franja de vacíos con aire ( $V_a$ ), mezcla 3.....	101
Tabla 38. Valores para la franja de vacíos del agregado mineral, mezcla 3.....	102
Tabla 39. Valores para la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA), mezcla 3 .....	103
Tabla 40. Cálculo del centroide para el polígono de vacíos de la mezcla 3.....	105
Tabla 41. Resumen del contenido óptimo de asfalto para las tres mezclas. ....	107
Tabla 42. Valores de flujo y estabilidad corregida para las tres mezclas.....	107
Tabla 43. Comparación y chequeo de los valores de estabilidad y flujo según las especificaciones INVIAS 2013. ....	108
Tabla 44. Valores de carga obtenidos del equipo Marshall para la mezcla 1 .....	109
Tabla 45. Resultados de la resistencia a la tensión para la mezcla 1.....	110
Tabla 46. Relación de la resistencia a la tensión de los subgrupos húmedo y seco para la mezcla 1 .....	110
Tabla 47. Valores de carga obtenidos equipo Marshall para la mezcla 2.....	110
Tabla 48. Resultados de la resistencia a la tensión para la mezcla 2.....	110
Tabla 49. Relación de la resistencia a la tensión de los subgrupos húmedo y seco para la mezcla 2 .....	111

Tabla 50. Valores de carga obtenidos del equipo Marshall para la mezcla 3 .....	111
Tabla 51. Resultados de la resistencia a la tensión para la mezcla 3.....	111
Tabla 52. Relación de la resistencia a la tensión de los subgrupos húmedo y seco para la mezcla 3 .....	111
Tabla 53. Resultados de la adherencia de las mezclas sometidas a investigación .....	112
Tabla 54. Valores de deformación obtenidos del ensayo de ahuellamiento. ....	114
Tabla 55. Resultados de velocidad de deformación para cada tipo de mezclas..	116
Tabla 56. Esfuerzo de tracción y deformación de las briquetas por fatiga .....	118
Tabla 57. Resultados de módulo resiliente para cada tipo de mezcla. ....	120
Tabla 58. Resultados de módulo resiliente para cada tipo de mezcla en la temperatura 20°C.....	121
Tabla 59. Distancia y precio de adquisición de materiales .....	132
Tabla 60. Precio unitario de cada mezcla por m3. ....	133

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de las escorias.....	37
Figura 2. Horno de arco eléctrico.....	44
Figura 3. Dimensión de una partícula .....	53
Figura 4. Esquema de una cara fracturada.....	53
Figura 5. Esquema de polígono de vacíos.....	56
Figura 6. Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada .....	57
Figura 7. Ilustraciones de los volúmenes considerados en la determinación de las gravedades específicas del agregado .....	59
Figura 8. Rango de valores de vacíos de aire que determinan las isométricas de $V_a$ e isolíneas de $V_a$ .....	61
Figura 9. Rango de valores de vacíos en el agregado mineral que determinan las isométricas de VMA e isolíneas de VMA.....	62
Figura 10. Rango de valores de vacíos llenos de asfalto que determinan las isométricas de VFA e isolíneas de VFA.....	62
Figura 11. Representación del polígono de vacíos .....	63
Figura 12. Centroides del polígono de vacíos .....	64
Figura 13. Máquina de ensayo para ahuellamiento .....	68
Figura 14. Esquema del ensayo de flexión en dos puntos o ensayo de la viga trapezoidal en voladizo. Esquema ensayo a flexión viga cargada en el punto central o ensayo en tres puntos .....	71
Figura 15. Esquema de ensayo de flexión viga cargada en el cuatro puntos. Esquema de ensayo de tensión indirecta .....	71
Figura 16. Configuración de carga y falla en el ensayo diametral.....	72
Figura 17. NAT (Nottingham Asphalt Tester) .....	72
Figura 18. Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas.....	73
Figura 19. Fisuración de pavimento por fatiga.....	74

Figura 20. Regresiones en tres porciones de la curva de deformación .....	75
Figura 21. Determinación de la deformación instantánea .....	76
Figura 22 Determinación de la deformación total.....	77
Figura 23. Localización fuente Cantera la Roca .....	80
Figura 24 Localización fuente Geardau -Diacó – Tuta.....	80
Figura 25. Localización fuente Arena- Cantera de arena de peña.....	80
Figura 26. Caracterización visual de los agregados pétreos .....	81
Figura 27. Localización de la empresa MPI – Barrancabermeja.....	81
Figura 28. Ficha técnica -Curva Reológica - CA 60/70 MPI.....	82
Figura 29. Curva reología del CA 60-70 .....	87
Figura 30. Diagrama de flujo para el proceso de diseño de las mezclas. ....	87
Figura 31. Gradación del agregado para las mezclas base.....	89
Figura 32. Composición de las mezclas .....	89
Figura 33 Franja de vacíos con aire de la Mezcla 1.....	92
Figura 34. Franja de vacíos del agregado mineral de la Mezcla 1.....	93
Figura 35. Franja de vacíos llenos de asfalto de la Mezcla 1. ....	94
Figura 36. Polígono de vacíos de la Mezcla 1 .....	95
Figura 37. Localización del centroide muestra 1.....	96
Figura 38. Franja de vacíos con aire de la Mezcla 2.....	97
Figura 39. Franja de vacíos del agregado mineral de la Mezcla 2.....	98
Figura 40. Franja de vacíos llenos de asfalto de la Mezcla 2. ....	99
Figura 41. Polígono de vacíos de la Mezcla 2 .....	100
Figura 42. Localización del centroide muestra 2.....	100
Figura 43. Franja de vacíos con aire de la Mezcla 3.....	102
Figura 44. Franja de vacíos del agregado mineral de la Mezcla 3.....	103
Figura 45. Franja de vacíos llenos de asfalto de la Mezcla 3. ....	104
Figura 46. Polígono de vacíos de la Mezcla 3 .....	104
Figura 47. Localización del centroide muestra 3.....	105
Figura 48. Determinación de la gravedad específica de los especímenes. ....	106
Figura 49. Valores de estabilidad para las tres mezclas asfálticas. ....	108

Figura 50. Valores de flujo para las tres mezclas asfálticas. ....	108
Figura 51. Resultados de la relación a la resistencia a la tensión de las mezclas sometidas a investigación.....	112
Figura 52. Equipo y resultado final para determinar la resistencia a la tensión ...	113
Figura 53. Curva de deformación plástica Mezcla 1. ....	114
Figura 54. Curva de deformación plástica Mezcla 2 .....	115
Figura 55. Curva de deformación plástica Mezcla 2 .....	115
Figura 56. Curva de deformación plástica para cada tipo de mezcla.....	116
Figura 57. Desempeño a la fatiga mezcla 1 .....	119
Figura 58. Línea de tendencia módulo resiliente M1 .....	120
Figura 59. Línea de tendencia módulo resiliente M2 .....	121
Figura 60. Línea de tendencia módulo resiliente M3 .....	121
Figura 61. Comparativo de porcentaje óptimo de asfalto.....	122
Figura 62. Comparativo de los resultados de la estabilidad.....	123
Figura 63. Comparativo de los resultados de la estabilidad.....	124
Figura 64. Comparativo de vacíos de aire en las mezclas.....	125
Figura 65. Comparativo de vacíos de aire en las mezclas.....	125
Figura 66. Comparativo de vacíos llenos de asfalto en las mezclas.....	126
Figura 67. Comparativo de la relación de la resistencia a la tensión .....	127
Figura 68. Comparativo de la deformación permanente de las mezclas .....	127
Figura 69. Comparativo de la velocidad de deformación permanente de las mezclas.....	128
Figura 70. Comparativo de la deformación vs número de ciclos M1.....	129
Figura 71. Comparativo de la deformación vs número de ciclos M2.....	129
Figura 72. Comparativo de la deformación vs número de ciclos M3.....	130
Figura 73. Comparativo de módulo resiliente para la $t = 20^{\circ}\text{C}$ .....	131
Figura 74. Uso de las escorias de hierro y acero en Europa en segundo semestre de 2016 .....	134
Figura 75. Producción de rocas y materiales de construcción a 2 segundo semestre de 2019 .....	135

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Resultados caracterización de los materiales

Anexo B. Reportes del ensayo de módulo resiliente, NAT

Anexo C. Reporte del ensayo de fatiga, NAT

Anexo D. Análisis de precios unitarios de las mezclas



## GLOSARIO

**ASFALTO:** material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenidos por refinación del petróleo.<sup>1</sup>

**AGREGADO GRUESO:** Agregado retenido en el Tamiz de 4.75 mm (No. 4).<sup>2</sup>

**AGREGADO FINO:** Agregado que pasa el Tamiz de 4.75 mm (No. 4).<sup>3</sup>

**ARENA:** Agregado fino resultante de la desintegración natural y abrasión de roca o del procesamiento de arenisca completamente friable.<sup>4</sup>

**CEMENTO ASFÁLTICO:** Asfalto que ha sido refinado para cumplir las especificaciones para pavimentación,<sup>5</sup> puede ser usado en aplicaciones industriales y usos especiales. Se requiere calor para darle fluidez

**ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAF:** Residuo siderúrgico que se genera durante el proceso de fabricación de acero en un horno eléctrico, cuya materia prima es la chatarra.<sup>6</sup>

**MEZCLA ASFÁLTICA:** Son combinaciones de agregados pétreos y un ligante asfáltico. Se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos pueden fabricarse *in situ*.<sup>7</sup>

**PAVIMENTO:** Estructura vial formada por una o varias capas de materiales seleccionados que se construyen técnicamente sobre la subrasante y es capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medioambiente, así como transmitir al suelo de apoyo o fundación esfuerzos y deformaciones tolerables, además de proporcionar la circulación de los vehículos con rapidez, comodidad, seguridad y economía.<sup>8</sup>

---

<sup>1</sup> ASTM International, west conshohocken, p. astm d8-19, standard terminology relating to materials for roads and pavements. 2018. Recuperado de WWW.astm.org.

<sup>2</sup> *Ibidem*.

<sup>3</sup> *Ibidem*.

<sup>4</sup> *Ibidem*.

<sup>5</sup> *Ibidem*.

<sup>6</sup> CEDEX, C. de E. y E. de obras P. Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos. 2011. pág. 1–34.

<sup>7</sup> RONDÓN, H. Asfaltos y mezclas asfálticas. Editorial Ecoe, Santafe de Bogotá. 2013.

<sup>8</sup> HIGUERA, Carlos. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2011.

**PROCESO SIDERÚRGICO:** proceso de transformación de materia prima del mineral hierro en acero, en una aleación metálica, constituida por hierro y una proporción especialmente reducida de carbono (entre 0.02 y 2%) más algunos metales adicionados (cromo, cobre, fósforo, magnesio, molibdeno, níquel, silicio, titanio, entre otros) que le otorgan a la aleación propiedades específicas.<sup>9</sup>

**PRUEBAS DE DESEMPEÑO:** Son los cuatro mecanismos de daño de las mezclas asfálticas en servicio, reportados en la literatura de referencia y se deben tener en cuenta en el diseño del pavimento, estos son ahuellamiento, susceptibilidad a la humedad, módulo resiliente y fatiga.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> JAURLARIZAKO, Eusko y otros. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Departamento de ordenación del territorio, vivienda y medio ambiente 112 (483): 211–12. 1996. Disponible: <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>

<sup>10</sup> RONDÓN, Hugo. Asfaltos y mezclas asfálticas. editorial académica española. 2013.

## RESUMEN

A medida que crece la preocupación por el impacto ambiental que generan los recursos generados por la industria del acero y en busca la sostenibilidad en el sector de la construcción, el uso de las escorias provenientes de la producción de acero como componente de las mezclas asfálticas ha generado el interés de muchas investigaciones. En Colombia por más de medio siglo el acero ha formado parte de las grandes y pequeñas obras de infraestructura, por tal razón, es importante usar los residuos generados en su proceso de fabricación, disminuir las emisiones generadas y la demanda de lugares para su almacenamiento. La empresa Geardau Diaco tradicionalmente vende o regala a la comunidad este recurso, y su uso ha sido limitado en sus aplicaciones.

Este trabajo de investigación busco establecer la conveniencia y el desempeño de la escoria negra de horno de arco eléctrico EAF, como remplazo del agregado pétreo grueso componente de las mezclas asfálticas en caliente, para lograr este objetivo se elaboraron dos posibles tipos de combinaciones, con la sustitución del 100% y 50% del agregado pétreo grueso, en una mezcla MDC-19. Este estudio se realizó considerando los requisitos de las normas INVIAS de 2013,

Para el diseño de la mezcla se usó la metodología RAMCODES, la cual por medio del análisis del polígono de vacíos disminuye a tres briquetas la determinación de la cantidad de asfalto necesario en la mezcla, haciendo más eficiente y rápida la determinación de la fórmula de trabajo.

Los resultados de este estudio permitieron determinar que el uso de la escoria como componente de las mezclas asfálticas si es conveniente, toda vez, que los ensayos de caracterización y las pruebas de desempeño de las mezclas tuvieron un buen comportamiento cumpliendo con los requisitos establecidos por las normas INVIAS, sin embargo, la combinación del 100% de EAF en remplazo del agregado pétreo mostro un resultado desfavorable al ensayo de la susceptibilidad a la humedad ya que se ubicó por debajo del valor establecido por la norma INVIAS-2013, probablemente se debe la escoria es más susceptible al daño en presencia de humedad y hace muy vulnerable su uso exclusivo como remplazo del agregado grueso.

## INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de nuevas tecnologías y en la búsqueda de la protección ambiental, en los últimos años han aumentado las investigaciones tendientes a la utilización de los desechos generados por la industria del acero. La escoria EAF es el residuo siderúrgico que se genera durante el proceso de fabricación de acero en un horno eléctrico, cuya materia prima es la chatarra<sup>11</sup>. Y para esta investigación es el recurso principal de estudio.

En Colombia, la producción del acero a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico EAF es realizada por Siderúrgica Gerdau Diaco Colombia S.A, Siderúrgica Nacional S.A, Siderúrgica de Occidente S.A, y Siderúrgica de Caldas S.A.S. entre las cuales tienen seis hornos de arco eléctrico. Además, se encuentra el horno de Acerías Paz del Rio, para un total de siete hornos de arco eléctrico. De acuerdo a las cifras de producción de acero para el año 2017 <sup>12</sup> Colombia en el puesto 50 de producción mundial de acero, produjo aproximadamente 1.3 millones de toneladas de acero, lo cual genera un estimado de 260.000 toneladas de escoria EAF.

En este trabajo se pretende analizar el comportamiento de la escoria EAF como sustituto del agregado grueso en una mezcla asfáltica tipo MDC – 19 diseñada según los criterios de las especificaciones.<sup>13</sup>, y verificar su beneficio ambiental y económico, Además, hace parte de las investigaciones del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo de la investigación, está se desarrolló en cuatro etapas. Inicialmente se presentan las generalidades donde se incluye el problema de investigación, objetivos, justificación y metodología. En segundo lugar, se hizo una revisión literaria, donde se definieron términos tales como procesos siderúrgicos y desechos generados en por la industria siderúrgica donde aparece la escoria EAF, además se citan las investigaciones que sirvieron de referencia para escoger a la escoria EAF como materia de investigación y se analizaron sus propiedades como sustituto de material grueso en mezclas asfálticas y verificación con las normas<sup>14</sup>. En esta misma etapa se incorporan los demás materiales usados en el diseño de concretos asfálticos, la normativa del Instituto Nacional de Vías<sup>15</sup> para dar cumplimiento a las especificaciones de uso de los mismos y la metodología

---

<sup>11</sup> CEDEX. Op. Cit. pág. 1–34.

<sup>12</sup> BASSON, Edwin. World Steel in Figures. World Steel Association. 2018. pág. 3–29.

<sup>13</sup> INVIAS. 2019. “Estado de La red vial nacional con criterio técnico para el primer semestre 2019.”

<sup>14</sup> *Ibidem*.

<sup>15</sup> *Ibidem*.

Ramcodes escogida para la elaboración de los especímenes estudiados. En la etapa tres, se realizó el diseño experimental con el fin de alcanzar los objetivos del proyecto. y finalmente se realizó la discusión de resultados y el análisis económico y ambiental de las escorias EAF para su uso en mezclas asfálticas.

## 1. GENERALIDADES

La sustitución de materiales pétreos que hacen parte de las mezclas asfálticas por materiales coproductos de la industria del acero, es un área que cada vez cobra más importancia en las investigaciones de nuestras universidades. Por tanto, esta investigación se enfoca en el uso de la escoria EAF como remplazo del material grueso dentro de una mezcla MDC-19. En este capítulo se plantea el problema de investigación, los objetivos que se pretenden desarrollar, la justificación de la investigación y la metodología para lograr desarrollar el proyecto.

### 1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Un sendero fue al inicio de la humanidad el medio por el cual las civilizaciones se desplazaron de un lugar a otro. Estos que inicialmente fueron empíricos y de herradura, a medida que avanzaron las civilizaciones y con la aparición de los vehículos inicialmente de tracción animal y luego a motor, se convirtieron después en caminos que ayudaban a trasladar sus mercancías, por esto el hombre empeño su interés para hacer de sus distancias disminuyeran y sus vías de comunicación terrestre fueran cada vez mejores y más eficientes. Se valió de los recursos naturales (minerales) para generar zonas duras, aparecen así los pavimentos para superar los obstáculos debidos a las adversidades de la naturaleza.

Los recursos naturales constituyen una fuente agotable que empiezan a preocuparnos, la explotación de canteras a cielo abierto es la actividad del proceso de fabricación o construcción que más influye negativamente en el entorno debido a lo espectacular de sus operaciones unitarias las cuales modifican notablemente el paisaje y por ello son fuentes de enfrentamientos con la sociedad, lo cual obliga a corregir dicho paisaje mediante restauraciones adecuadas que reduzcan los impactos negativos.<sup>16</sup> Además, el cambio climático ha generado una angustia general y los desechos industriales se han convertido en una alternativa de investigaciones con el fin de ser utilizadas como sustituto de dichos recursos.

La fabricación de acero se desarrolló básicamente en el siglo XIX, al inventarse los procesos de fusión; el Bessemer (1855), el horno de hogar abierto, normalmente calentado a base de gas pobre (1864); y el horno eléctrico (1900). Desde mediados del siglo XX, el tratamiento de oxígeno principalmente el proceso Linz-Donowitz (LD) de lanza de oxígeno hizo posible la fabricación de aceros de alta calidad con costos

---

<sup>16</sup> CORREA, Álvaro. Situación actual de la explotación de las canteras en el Distrito Capital. 2000.

de producción relativamente bajos.<sup>17</sup>

Masaitis y Schneider indican, además que muchos subproductos (escoria) pueden ser utilizadas como remplazo de la grava para carreteras. El acero, con independencia de su calidad, tamaño, uso o permanencia en servicio, es completamente reciclable, y puede reutilizarse repetidamente sin que se degraden en modo alguno sus propiedades mecánicas, físicas o metalúrgicas.

El horno de arco eléctrico fue desarrollado por el francés Paul Héroult en EE. UU en 1907, utilizados inicialmente para la producción de aleaciones de acero, fue después cuando se utilizó para la fabricación de acero debido al bajo costo en relación con la capacidad de producción y calidad.<sup>18</sup>

En Colombia, la producción del acero a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico EAF es realizada por Siderúrgica Gerdau Diaco Colombia S.A., Siderúrgica Nacional S.A, Siderúrgica de Occidente S.A, y Siderúrgica de Caldas S.A.S. entre las cuales tienen seis hornos de arco eléctrico. Además, se encuentra el horno de Acerías Paz del Rio, para un total de siete hornos de arco eléctrico.

Las etapas básicas de la fabricación del acero en el horno eléctrico son la fusión de las chatarras por la corriente eléctrica y el afino posterior del baño fundido. La etapa de fusión incluye una serie de fases como la oxidación dirigida a eliminar impurezas de magnesio y silicio, la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. La etapa de afino incluye la desoxidación que permite la eliminación de óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descarburación del acero. (“Libro Blanco Para La Minimización de Residuos y Emisiones” 1966). La fabricación de acero genera una serie de residuos procedentes del proceso y la depuración de humos como son las escorias negras y blancas, los polvos de acería y refractarios.

En cuanto a la producción de escoria resultante de la producción del acero se tiene según el Centro de Investigación Metalúrgica IK-4 Azterlan, de cada tonelada de acero producido se generan 200 kg de este residuo. Sólo la Unión Europea, genera anualmente 6.5 millones de toneladas de escoria negra procedente de la tecnología

---

<sup>17</sup> MASAITIS, John, SCHNEIDER H. La industria del hierro y el acero. 2002

<sup>18</sup> PENTEADO, Carmen Lucia, SANTOS, Giordano, Beatriz LEÃO Evangelista, Gisleiva Cristina, DOS SANTOS FERREIRA, Pedro Henrique, ANDRADE, BORGES, CECHE LINTZ, Rosa Cristina. Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving Blocks. Ambiente Construido. 2019. 19 (2): 21–32. Disponible: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000200305>.

de horno de arco eléctrico.<sup>19</sup>, con base en este dato, de acuerdo a las cifras de producción de acero para el año 2017. <sup>20</sup> Colombia en el puesto 50 de producción mundial de acero con 1.3 millones de toneladas. Produjo aproximadamente 260.000 toneladas de escoria negra.

De acuerdo con lo anterior, para esta investigación se deben plantear las siguientes preguntas que harán parte de la hipótesis planteada. ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de las escorias que permiten sustituir el 50% y el 100% del agregado grueso en las mezclas asfálticas?, después de estudiadas estas propiedades, y con respecto al desempeño ¿Cómo será el desempeño de la resistencia a la fatiga y el módulo resiliente de las mezclas con escoria, mayor menor o igual respecto al comportamiento de la mezcla convencional?, y ¿Qué conveniencia tendrá aplicar la metodología Ramcodes para realizar esta investigación, comparadas con metodologías más utilizadas actualmente?.

Este proyecto hace parte de la investigación SGI-2233 cuyo investigador principal es el ingeniero RICARDO OCHOA DIAZ, enmarcado en los proyectos del grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL. Dentro de este proyecto se han realizado varios trabajos a nivel de pregrado en los cuales se ha investigado el uso de la escoria de arco de horno eléctrico (EAF), escoria de horno al oxígeno (BOF), y polvillo de alto horno (BFD). Además, utilizaron cemento Portland como pasa tamiz 200. En este proyecto utilizara la escoria (EAF) y como material llenante usare el producto de la trituración de la grava

## **1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

**1.2.1 Objetivo General.** Desarrollar un análisis y trabajo experimental a nivel de laboratorio para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente tipo MDC-19 sustituyendo parcial y totalmente el agregado grueso por escoria de horno de arco eléctrico (EAF).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales a utilizar y la composición química de la escoria EAF.
- Determinar la fórmula de trabajo adecuada con la implementación de la metodología RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas.

---

<sup>19</sup> UNAMUNZAGA, Lucía. Nuevas aplicaciones industriales de alto valor añadido para escorias negras de acerías. Interempresas. 2018. 46.

<sup>20</sup> BASSON, Edwin. World steel in figures. World Steel Association. 2018. pág. 3–29.



- Analizar el comportamiento mecánico y propiedades de desempeño de las mezclas asfálticas.
- Establecer una comparación técnica y económica de la mezcla convencional y la mezcla con escoria EAF.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las necesidades existentes en Colombia en materia de construcción vial obligan a la revisión de diferentes alternativas de materiales a ser utilizados. El costo por kilómetro en las vías pavimentadas se ve altamente influenciado por el de los agregados usados. La escoria de horno de arco eléctrico se constituye en una alternativa como agregado para mezclas asfálticas que debe ser estudiada técnica y científicamente, ya que en el medio local se encuentra disponible y sus costos son bajos. Aunado a lo anterior se deben tener en cuenta cifras tales como: la red vial colombiana.<sup>21</sup>

En Colombia, según el ministerio de transporte en el año 2016 la red de carreteras está conformada por 16.968 km. de red de primer orden, 45.137 km. de segundo orden y 124.284 km. de tercer orden; es decir que la red vial terciaria es la de mayor extensión y en conjunto con las vías secundarias comprenden el 90.8%

Las siguientes estadísticas son manejadas por el Instituto Nacional de Vías, y para el primer semestre de 2019 el estado de la red vial pavimentada es: muy bueno 18.29%, bueno 45.34%, regular 25.87%, malo 10.45%, muy malo 0.06%. El estado de la red vial no pavimentada al primer semestre de 2019 es: Muy bueno 0.00%, bueno 19.48%, regular 23.21%, malo 48.63% y muy malo 8.68%.<sup>22</sup>

Estos datos indican que es necesario mejorar la red vial nacional y dirigir las investigaciones de las universidades al mejoramiento de los pavimentos en forma técnica y económica para alcanzar los estándares internacionales de vías en el mundo.

Dentro del margen del programa marco europeo Horizonte 2020,(Unamunzaga 2018) existe un proyecto llamado Reslag, persigue la valoración de la escoria en cuatro ámbitos diferentes:

---

<sup>21</sup> INVIAS. Estado de la red vial nacional con criterio técnico para el primer semestre 2019.

<sup>22</sup> Ibídem.

- Materia prima para la recuperación de metales de alto valor añadido.
- Medio de almacenamiento térmico para la recuperación, de calor residual en acería.
- Material de almacenamiento térmico para extender la producción eléctrica en centrales termo-solares.
- Materia prima para la fabricación de materiales refractarios.

En este proyecto están vinculados varios equipos multidisciplinarios formados por 3 universidades, 7 centros de investigación y 8 empresas; las universidades vinculadas son: FAU (Friedrich Alexander Universität en Alemania), Imperial College London (Gran Bretaña); expertos en caracterización de materiales avanzados y ETH Zürich (Alemania); experto en ciencia de ingeniería térmica y química. Los centros de investigación son: Ik4 – AZTERLAN (Países Bajos) es un centro de tecnología privado especializado en metalurgia enfocado en realizar actividades de Investigación y Desarrollo con diferentes tecnologías de transformación de materiales metálicos, CIC EnergiGune (Álava, provincia española) coordinador del proyecto y expertos en tes para recuperar el calor, CEA (Francia) expertos en Hidrometalurgia y valoración de materiales, INEA (Italian National Agency for New Technology) expertos en tecnologías sostenibles con el medio ambiente, DRL (Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt) es un centro de investigación espacial alemán, vinculado en la investigación de las escorias y la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, LCE(Life Cycle Engineering en Italia) expertos en evaluación del ciclo de vida de los materiales, el diseño ecológico y ambiental con el cumplimiento de las normas. Entre las empresas se destacan: GENERAL ELECTRIC con sede en Francia y Suiza, expertos en integración técnica y diseño de ingeniería, NOVARGI (empresa española) expertos en diseño de equipos térmicos, MASEN (empresa marroquí) empresa especializada en energía solar e interesada en el proyecto en la generación de energía a partir de la escorias, RENOTECH OY (empresa de Finlandia) dedicada a los productos para la industria de la construcción, CENER (empresa española) expertos en almacenamiento y producción de energía.

En Colombia, se realizan en diferentes universidades varias investigaciones con referencia principal al uso de las escorias. Sin embargo, es importante la vinculación de la empresa privada y que se desarrollen programas a corto, mediano y largo plazo con el fin de contribuir a la reutilización de estos desechos industriales. Por una parte, la empresa Diaco en el municipio de Tuta a entregado sus residuos para obras como estabilidad de terrenos y vías, las cuales se realizan en forma emperica.

Es necesario partir de ensayos para determinar las dosificaciones óptimas que determinen el tipo de mezcla ideal que cumpla con los parámetros necesarios del Instituto Nacional de Vías en el país. Al escoger la escoria EAF como material alternativo de remplazo al agregado pétreo se busca contribuir al reciclaje de los desechos de la industria del acero. Además, el análisis y trabajo experimental se

enmarcará a la metodología Ramcodes.

## **1.4 METODOLOGÍA**

La metodología de la investigación se fundamentó en varios procesos que se describen a continuación.

Se revisó el estado del arte de los proyectos que ayudaron a direccionar la investigación, estos artículos contemplaron uso de la escoria EAF, y algunos otros materiales usados como remplazo de los agregados gruesos.

Se recolectó toda la información que permitió conocer el proceso metalúrgico del acero que da origen a la escoria, subproducto del cual la investigación estuvo centrada, se reconocieron las propiedades de la escoria.

Se realizaron ensayos de caracterización de los materiales pétreos: análisis granulométrico del agregado grueso y fino, solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio, densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino y grueso, determinación del valor del 10% de finos, porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso, determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría), proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos.

Al cemento asfáltico: ductilidad de materiales asfálticos, penetración de los materiales asfálticos, densidad de los materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del Picnómetro), puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland, punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola), determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional.

Para el diseño de las mezclas se determinó la fórmula de trabajo mediante la metodología Ramcodes, se realizaron ensayos de susceptibilidad a la humedad, ahuellamiento, resistencia a la fatiga y módulo resiliente.

Finalmente, se realiza un análisis del comportamiento de las mezclas (MCD-19) usando los diferentes porcentajes escoria como remplazo del agregado grueso, versus la mezcla convencional, y su conveniencia económica y medio ambiental.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Este capítulo presenta el estado del arte y algunas investigaciones que se han realizado utilizando las escorias dentro de mezclas asfálticas, y en otras investigaciones, además se presenta la información de los tipos de escorias que se producen en la industria de la metalurgia y el proceso siderúrgico para la obtención del subproducto a estudiar, también se especifican los materiales utilizados para la elaboración de los concretos asfálticos y los tipos de mezclas, la metodología utilizada y finalmente describir las pruebas necesarias para verificar el desempeño de las mezclas investigadas.

### 2.1 UTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

En el campo del diseño de mezclas asfálticas se pretende encontrar componentes ecoeficientes provenientes de los residuos industriales, por tanto, se encuentra en la literatura una diversidad de materiales que hasta el momento se han investigado. Un breve recuento de los materiales usados con este fin se presenta a continuación.

El pavimento de asfalto recuperado (RAP, por sus siglas en inglés). Estos materiales se generan cuando los pavimentos asfálticos son removidos para reconstrucción o rehabilitación<sup>23</sup> Anota es mismo autor, que la dificultad principal del uso del RAP es el control de contenido de asfalto, por tanto, la metodología para caracterizar este material al ser usado dentro de las mezclas nuevas debe cumplir con ensayos tales como: realizar la extracción de disolvente (AASHTO T-164) que permite determinar el contenido de asfalto en las muestras de RAP, el ligante asfáltico recuperado debe ser analizado para determinar su grado de desempeño utilizando AASHTO M320. La granulometría del agregado extraído de las muestras de RAP debe ser determinado de acuerdo con AASHTO T30. La gravedad específica ( $G_{sb}$ ) debe ser determinado por AASHTO T84 para agregados finos y T85 para agregados gruesos, y sobre todo recomienda no estimar la gravedad específica del agregado del RAP a partir de la gravedad específica máxima teórica del RAP ( $G_{mm}$ ) ya que esto daría lugar a un  $G_{sb}$  sobreestimado y un error en el VMA calculado que probablemente daría lugar a una mezcla de pobre desempeño. La ventaja significativa de su uso radica en la economía y ayudar al medio ambiente.

En el año 2016, Yung y otros realizaron un estudio de caso donde evaluaron el desgaste por abrasión de una mezcla modificada con residuo de llanta triturada (GCR). Evaluaron en laboratorio, la resistencia al desgaste por abrasión (ensayo de Cántabro) y la rigidez bajo carga monotónica (Marshall) y cíclica (módulo resiliente)

---

<sup>23</sup> LEIVA, VILLACORTA, Fabricio, VARGAS, NORDCBECK. Adriana. Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Infraestructura Vial* 19 (33). 2017. Pág. 35–44.

de una mezcla asfáltica drenante MD fabricada con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR) por vía húmeda y asfalto CA 60-70. (Yung.V., Cordoba.M., and Rondón.Q. 2016), sus resultados fueron un incremento de los parámetros estudiados y concluyeron la importancia que tiene las temperaturas de mezcla entre el asfalto y el GCR, así como la de compactación (asfalto modificado y agregado) en el comportamiento de MD que contenía GCR.

En Bogotá mediante los decretos 442 de 2015 y 265 de 2016 por medio del se crea el Programa de aprovechamiento y/o valoración de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones. Además, las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano IDU-560-11 reglamenta el uso de mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda.

La influencia de cuatro aditivos no convencionales en las propiedades dinámicas y reológicas de un asfalto 60/70, fueron estudiados por Delgado,<sup>24</sup> los aditivos utilizados fueron: grano de caucho reciclado (CGR), polímeros de baja densidad (PEBD), un bitumen natural (Gilsonita) y un asfalto químico (Husil), estos dos últimos aplicados por vía húmeda en un porcentaje de inclusión con respecto al peso total de cada muestra de CA (1000 gr). Implementaron técnicas del Reómetro de corte dinámico (DSR), prueba de Creep repetitivo multi-esfuerzo (MSCR), barrido de amplitud lineal (LAS), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la respuesta ante fenómenos de fatiga y ahuellamiento como principales mecanismos de daño en el pavimento asfáltico. La investigación les permitió afirmar que el grado de funcionamiento a altas temperaturas mejoradas en los CA modificados con Gilsonita, GCR y PEBD reduciendo la posibilidad de ahuellamiento aumentando la rigidez de las capas asfálticas; por otro lado, los CA modificados con Husil y GCR mejoraron su desempeño a temperaturas intermedias. Aumentaron su nivel de elasticidad y disminuyeron la posibilidad de agrietamiento por fatiga; comparado con respecto al CA original.

La asfaltita y el caucho reciclado<sup>25</sup> fueron incorporadas a los aglomerantes asfálticos. El objetivo de esta investigación era analizar la rigidez, bajo cargas de compresión axial, de las mezclas de asfalto modificadas con estos dos componentes incorporados por proceso húmedo. Las combinaciones usadas fueron descritas así: mezclas con asfalto puro como referencia, mezclas con asfalto y asfaltita, 5 y 10% de mineral en relación con la masa de CA total, mezclas de CA

---

<sup>24</sup> DELGADO JOJOA, Miguel G. SÁNCHEZ GILEDE, Jessica A, RONDÓN QUINTANA, FERNÁNDEZ GÓMEZ, Wilmar D.; REYES LIZCANO, Freddy A. Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. *Ingeniería e Investigación* 38 (2). 2018. Pág. 18–26. Disponible: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.68638>.

<sup>25</sup> MANTILLA FORERO, Javier Eduardo, CASTAÑEDA PINZÓN, Eduardo Alberto. Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders1. *DYNA (Colombia)* 86 (208): 2019. págs. 257–63. Disponible: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69400>.

con 8% de CR, mezclas con 8% de CR, asfaltita 5% y AC 10% y finalmente se hicieron mezclas de asfalto 10% y asfaltita con 10%. Todas las incorporaciones fueron realizadas a 160°C durante un tiempo de 20 minutos. La conclusión a esta investigación fue que la combinación simultánea de estos materiales mejora las propiedades de CA, aumentando la capacidad de carga, logrando menor susceptibilidad térmica, mayor elasticidad y mejor recuperación a las deformaciones, evitando posibles problemas en el pavimento causados por la baja flexibilidad en el aglomerante asfáltico.

La escoria de cobre (EC), el residuo de asfalto recuperado (RAP), y el agregado regular (AR) combinados, fueron estudiados por Raposeiras y otros, buscaban que la utilización de las escorias ayudase a solventar los problemas en las mezclas asfálticas que usaban exclusivamente el RAP; teniendo en cuenta que el contenido de CA depende del residuo de asfalto recuperado los porcentajes de los agregados corresponden al 100% del volumen de la probeta. Realizaron cuatro grupos con cuatro tipologías de dosificación. En el grupo A tipología I 100%AR, tipología II 85%AR, y 15%EC, tipología III 75%AR y 25%EC y tipología IV 65%AR y 35%EC. Grupo B tipología I 80%AR y 20%RAP, tipología II 65%AR, 20%RAP, tipología III 55%AR, 20%RAP y 25%EC, tipología IV 45%AR, 20%RAP y 35%EC. Grupo C tipología I 70%AR, 30%RAP, tipología II 55%AR, 30%RAP y 15%EC, tipología III 45%AR, 30%RAP y 25%AC y tipología IV 35%AR, 30%RAP y 35%EC y el grupo D tipología I 60%AR y 40%RAP, tipología II 45%AR, 40%RAP y 15%EC, tipología III 35%AR, 40%RAP y 25%EC y tipología IV 25%AR, 40%RAP y 35% EC.<sup>26</sup>

Los resultados fueron: al incorporar EC a las mezclas calientes con RAP, aumenta la densidad de la mezcla cerca al 16%, debido al contenido de hierro en la composición. La resistencia a la tracción indirecta se incrementó entre 20 y 50% dependiendo de la combinación de RAP y EC. A bajas temperaturas, las mezclas con EC aprovechan la angulosidad y posesividad de estos materiales, incrementando la resistencia final.

## **2.2 ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO**

La escoria de arco eléctrico EAF (por sus siglas en inglés) es un conjunto de residuos peligrosos de tipo cerámico generado por la industria metalúrgica y producido en todo el mundo por millones de toneladas. Tal como su nombre lo indica, es un subproducto producido por el horno de arco eléctrico aproximadamente a 1600° C y está compuesto por elementos tales como Zn, Cd y Pb presentes en la chatarra que se volatiliza y condensa.

---

<sup>26</sup> RAPOSEIRAS, A, D Movilla, A, VARGAS, R. Bilbao, and CIFUENTES, C. Evaluación de rigidez Marshall, tracción indirecta y módulo resiliente en mezclas asfálticas con RAP y escoria de cobre. *Revista Ingeniería de Construcción* 32 (1). 2017. Pág. 15–24. Disponible: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000100002>.

Son varios los estudios previos del uso de las escorias y residuos siderúrgicos como parte de la mezcla asfáltica en los pavimentos, debido a su potencial uso se ha documentado investigaciones con el propósito de estandarizar la dosificación de las mezclas y las propiedades físicas y mecánicas, así como la busca de disminuir el impacto ambiental generado por los residuos de la industria del acero, inicialmente se referencia la investigación: Escoria de EAF en mezclas asfálticas: una breve revisión de su posible reutilización<sup>27</sup> la cual estuvo dirigida a la determinación de propiedades químicas, físicas y mecánicas de las escorias negras de alto horno para ser utilizadas en las mezclas asfálticas. Destacando que los componentes químicos más relevantes de las escorias y que permiten un buen comportamiento al ser utilizadas en las mezclas asfálticas sea los óxidos de hierro junto con la cal. Dicha presencia influye en las propiedades finales como son la densidad, la resistencia a la abrasión y el desgaste de las mismas. Dentro de las características físicas y mecánicas de las escorias están: agregados limpios no plásticos, con baja presencia de finos y alto equivalentes de arena, agregado grueso con buena forma, alta angularidad y textura rugosa.

De acuerdo con la Asociación Mundial del Acero<sup>28</sup>, el promedio anual de producción de acero es de aproximadamente, 1,6 billones de toneladas. De esta cifra el 33% es producido por hornos de arco eléctrico, por tanto, la producción de EAF representa entre 1-2% de la carga en el horno significando que cada año entre 16.000 a 32.000 toneladas de esta escoria se generan en todo el mundo. Entre sus usos reportados se encuentran como componente en la fabricación de ladrillos, componente de algunas mezclas de concreto Portland, en el betún de asfalto se utiliza como aglutinante, y otros más. Es importante destacar que la escoria EAF presenta un proceso de solidificación económico y adecuado para estabilizar estos residuos, por tanto, este residuo se ha investigado en el mundo entero como componente de cemento asfáltico con el fin de utilizar este tipo de residuos para la infraestructura vial. También se ha usado ampliamente en concreto asfáltico la escoria de acero de oxígeno básico, la cual ha venido siendo objeto de estudios en ingeniería con el fin de lograr fórmulas que optimicen los procesos de cimentación en asfalto logrando mayor durabilidad.<sup>29</sup>

A continuación, se presenta un breve recuento de los estudios que se han efectuado a nivel internacional y a nivel nacional de las escorias de horno de arco eléctrico.

---

<sup>27</sup> SKAF, Marta; MANSO, Juan M; ARAGÓN, Ángel; FUENTE ALONSO, José A.; ORTEGA LÓPEZ, Vanesa. EAF slag in asphalt mixes: a brief review of its possible re-use, resources, conservation and recycling 120. 2017. pág. 176–85. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>.

<sup>28</sup> ALBERTO, Carlos; RESTREPO CARVAJAL, Juan Fernando; TABORDA OSORIO. El mercado colombiano del acero estructural en el contexto de la globalización. Revista Ciencias estratégicas 25 (38). 2017. pág. 339–59. Disponible: <https://doi.org/10.18566/rces.v25n38.a5>.

<sup>29</sup> LOAIZA, Alexandra; GARCIA, Edwin; COLORADO, Henry A. Evaluation of asphalt binder blended with coconut coir dust and residual coconut fibers for structural applications. Revista de la Construcción 17 (3). 2019. pág. 542–54. Disponible: <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.542>.

**2.2.1 A nivel internacional.** En Italia estudiaron posibles “soluciones sostenibles para pavimentos de carreteras”<sup>30</sup>, por medio de una caracterización multi-escala de asfaltos de mezcla en caliente que contenía escorias de acero. Estos autores, además, valoraron en su investigación la aplicación en relación con el uso de materiales y tecnologías respetuosas del medio ambiente en pavimentos de carreteras motivados principalmente por el aumento de conciencia pública dirigida a la protección y conservación del medio ambiente. En este sentido para los autores la opción más válida es la mezcla cálida de asfalto WMA, ya que es un hormigón de asfalto que puede ser preparado y compactado a temperaturas más bajas que la mezcla de asfalto caliente tradicional HMA y la inclusión de materiales y residuos reciclados pueden mejorar más su sostenibilidad ambiental. Su trabajo ilustra los resultados globales de un estudio de investigación destinado a verificar la viabilidad de la utilización de escorias de acero en hormigones asfálticos mediante la investigación en el laboratorio de las propiedades de gama media y de gama alta temperatura de uso de aglutinantes cálidos bituminosos, así como masillas y mezclas que contienen agregados de escoria de acero para lo cual se utilizó un aditivo tensioactivo químico; produjeron en una planta metalúrgica escorias de acero por tratamiento de horno de arco eléctrico EAF.

Para evaluar el efecto combinado de escorias de acero EAF manufacturados y aditivo químico caliente, se llevó a cabo, teniendo en cuenta aglutinantes no modificados, así como masillas y mezclas preparadas con sólo agregados naturales. Tanto aglutinantes como masillas y mezclas fueron estudiados en términos de rigidez, fatiga y resistencia a deformación permanente con la realización de pruebas dinámicas en muestras envejecidas, no envejecidas y a largo plazo. Finalmente, los resultados mostraron que los materiales más limpios preparados combinando tecnología caliente química y agregados de escoria de acero de horno eléctrico parecen asegurar un rendimiento igual o incluso mayor que los materiales mezclados calientes tradicionales, lo que demostraba una aplicabilidad prometedora en el campo.

Los laboratorios de la Universidad Tecnológica de Malaysia fue el centro de prácticas de la “Evaluación comparativa de la mezcla de asfalto de grado denso y la posible incorporación de escoria de horno de arco eléctrico y los residuos de minas de cobre”<sup>31</sup>, queriendo ser pioneros en la materia en Malasia ya que el uso de materiales agregados no convencionales en las obras viales está todavía en una

---

<sup>30</sup> PASETTO, M.; BALIELLO, A.; GIACOMELLO, G; PASQUINI, E. Sustainable solutions for road pavements: a multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production* 166 (x). 2017. pág. 835–43. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>.

<sup>31</sup> OLUWASOLA, Ebenezer Akin; MOHD, Rosli Hainin, MANIRUZZAMAN, Md; AZIZ, A. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. *Journal of Cleaner Production* 122. 2016. pág. 315–25. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.051>.



fase experimental en este país y la utilización persistente de los agregados convencionales en la construcción de carreteras y autopistas se ve como un peligro potencial para el medio ambiente, por lo cual la investigación del comportamiento de materiales agregados es valiosa ya que podrían aliviar el problema. Por tales razones, el estudio propuso una investigación sobre la idoneidad de la escoria de horno de arco eléctrico (EAF), de la escoria de acero de colas de las minas de cobre (CMT) como materiales alternativos de pavimentación de asfalto. Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio para evaluar el desempeño de las mezclas que incorporaron EAF y CMT a cuatro mezclas de materiales de dieciséis diseños de mezcla, ocho ACW 14 diseñados y ocho SMA 14 diseñados fueron evaluados: mezcla No. 1 fue del 100% de granito (material granular convencional), mezcla No. 2 consistía en 80% de granito y 20% CMT, mezcla No. 3 consistía en 80% de escoria de acero EAF y 20% CMT mientras mezcla No. 4 consistía en 40% de escoria de acero EAF, 40% de granito y 20% CMT.

Las mezclas fueron sometidas a ensayos de susceptibilidad a la humedad, desempeño a la fatiga, ahuellamiento y módulo resiliente. Los resultados del ensayo indicaron que las mezclas que contienen escoria de acero EAF y CMT satisficieron las especificaciones estándar para las carreteras de Malasia, excepto la absorción al agua pues determinaron que el alto porcentaje de absorción de agua de estos materiales posiblemente se debe a la mayor cantidad de poros que presentan las escorias con respecto a los agregados pétreos. Además, mostraron que las muestras a las cuales se les incorporo EAF y CMT muestran un bajo valor de TSR (relación de resistencia a la tracción), sin embargo, se aclara que la susceptibilidad a la humedad de las muestras que contienen escoria de acero EAF y CMT no parece ser un problema.

Los resultados al ahuellamiento mostraron que las mezclas que contienen EAF y CMT son más superiores y menos susceptibles a la deformación permanente. Específicamente la mezcla No. 3 que consistió en 80% de escoria de acero EAF y 20% de CMT demostró exhibir la mayor resistencia a la deformación permanente para las muestras no envejecidas y envejecidas en comparación con mezcla de control. En vista de los resultados prometedores del estudio se concluyó la contribución significativa en la reducción del agotamiento de los recursos naturales, se concluye que las escorias EAF y la CMT son materiales adecuados para ser usados en los pavimentos o en las mezclas asfálticas reduciendo también costos y preservación del medio ambiente.<sup>32</sup>

En el año 2012 para el V Congreso Internacional sobre La sostenibilidad de las infraestructuras de carretera, los ingenieros italianos Marco Pasetto y Nicola Baldo presentaron los resultados de su estudio titulado “Fatiga, comportamiento y

---

<sup>32</sup> PASETTO, Marco; BALDO, Nicola. Recycling of steel slags in road foundations. *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (6). 2010. pág. 773–77.

caracterización de mezclas bituminosas elaboradas con pavimento asfáltico recuperado y escoria de acero” donde en primer lugar, se discuten tal como su nombre lo indica, los resultados de una evaluación de laboratorio y un estudio teórico sobre el comportamiento a la fatiga de las mezclas bituminosas con pavimento asfáltico recuperado y agregado de escoria de acero de horno de arco eléctrico, utilizándolo en diferente proporción. La investigación experimental se realizó con el ensayo de flexión de cuatro puntos. Por su parte, la resistencia a la fatiga fue evaluada mediante tres enfoques diferentes, en base a la reducción del 50% del módulo de rigidez inicial, la energía disipada y la acumulación de daños. Concluyendo que respecto a la mezcla de agregado natural (piedra caliza triturada y arena, las mezclas bituminosas con agregado de pavimento asfáltico recuperado RAP y la escoria de acero de horno de arco eléctrico presentaron propiedades visiblemente mejoradas en cuanto a fatiga y rendimiento.<sup>33</sup>

En la universidad de Brescia Italia, los investigadores<sup>34</sup>, presentaron los resultados de su estudio “Reutilización de escorias de acero en mezclas bituminosas para pavimento”, en el cual se evaluaron las propiedades mecánicas y el ajuste ambiental de escorias de horno de arco eléctrico en mezclas asfálticas. Se efectuaron varias pruebas en muestras de escoria negra para caracterizar las propiedades físicas, geométricas, mecánicas y químicas como es requerido por las especificaciones de la norma italiana UNI EN, centrándose además en la expansión volumétrica asociada con la hidratación de CaO libre y MgO. Se realizaron cinco mezclas bituminosas con contenidos de hasta 40% de escoria de horno de arco eléctrico, y se ensayaron para determinar la estabilidad Marshall y resistencia a la tracción indirecta. Además, se evaluó el comportamiento de lixiviación de las muestras de escoria y mezclas bituminosas según el ensayo de lixiviación UNI EN. La escoria probada mostró propiedades físicas y mecánicas satisfactorias y una liberación de contaminantes en general por debajo de los límites establecidos por el Código italiano. Las concentraciones Cal libre y de óxido de magnesio, responsables de los fenómenos expansivos, fueron 16-22% y 2-3% respectivamente. Se fabricaron pastas de escoria, pastas de cemento y pastas con 50% de escoria y 50% de cemento, con resultados poco favorables para las que tenían contenidos del desperdicio siderúrgico. En cuanto a los morteros la escoria fue utilizada como ligante obteniendo resistencias relativamente bajas. Se estudió el comportamiento de la escoria, como árido fino para morteros presentando una resistencia a la compresión a los 28 días de 65.5 MPa contra una resistencia de 43.0 MPa obtenida para la mezcla patrón. La resistencia a la flexo-tracción también presentó un aumento de la mezcla tradicional con respecto a la mezcla con adición de escoria, mostrando valores de 8.1 MPa y 10.8 MPa respectivamente. Por último, se prepararon mezclas de hormigón con adición de escoria como árido grueso y otras

---

<sup>33</sup> *Ibíd.*

<sup>34</sup> SORLINI, Sabrina; SANZENI, Alex. YRONDI, Luca. y BALDO, Nicola. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag, Padua: Universidad de Padua. Italia; 2010.

con adición de escoria como árido fino, presentando un aumento en la resistencia con valores aproximados de 10% y 11% respectivamente, con respecto al hormigón de referencia, este estudio es importante porque aún sigue siendo referente para las generaciones que han venido ampliando el tema con posterioridad

**2.2.2 A nivel nacional.** En la universidad de Antioquía y en colaboración de Corasfaltos S.A. los investigadores: Alexandra Loaiza, Sergio Cifuentes y Henry Colorado, realizaron un trabajo que consistió en estudiar el comportamiento del asfalto modificado con polvo de acero de horno de arco eléctrico superfino (polvo EAF) con alto contenido de óxido de zinc. Su investigación consistió en el uso de polvo de EAF en una mezcla de asfalto usando hasta 50% en peso. Usaron técnicas para el análisis por microscopía óptica y barrido electrónico. Se realizaron espectros infrarojos de transformada de Fourier, penetración, punto de reblandecimiento y pruebas de viscosidad.<sup>35</sup> (Loaiza, Garcia, and Colorado 2019)

El asfalto de penetración 60/70 lo suministró Ecopetrol, el polvo residual de EAF la empresa Ternium S.A. La composición del polvo de EAF se midió con una Fluorescencia de rayos X Thermo model Optim`x, donde, se verificó su composición los cuales dieron como resultado el contenido de óxido de hierro 21.5% y óxido de zinc 50.4%. La granulometría de residuos se hizo usando un tamiz #200, las mezclas de asfalto se prepararon así: asfalto puro, 10,15, 20, 30 y 50% en peso de polvo de EAF, la mezcla se realizó con un agitador mecánico Velp Scientifica durante 1 hora a 155°C y 200 rpm para garantizar una buena distribución del polvo y líquido para lograr una impregnación del asfalto con las partículas del residuo. Luego se observó la distribución del polvo con un microscopio óptico Leica. La mezcla se depositó luego en un portaobjetos de vidrio y pulverizado en un sistema Hummer 6.2 (15mA CA durante 30s) creando una película de aproximadamente 1 mm de espesor.

Las pruebas de penetración se realizaron siguiendo el estándar ASTM D5 A 25°C usando un penetrómetro de tipo controles. El punto de ablandamiento se realizó siguiendo ASTM D36 utilizando el aparato de anillo y bola. Las pruebas de viscosidad se llevaron a cabo en un equipo rotacional, viscosímetro Brookfield a 60° C para evaluar la trabajabilidad a diferentes temperaturas, el índice de penetración se estimó a partir de la penetración y para los resultados se utilizaron las ecuaciones correspondientes.

Resultados: las imágenes de la microscopía electrónica de barrido (SEM) del polvo EAF muestran que las partículas de desechos son pequeñas y tienen una

---

<sup>35</sup> LOAIZA, Alexandra; GARCIA, Edwin and COLORADO, HENRY A. Evaluation of asphalt binder blended with coconut coir dust and residual coconut fibers for structural applications. Revista de La Construcción 17 (3). 2019. pág. 542–54. Disponible: <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.542>.

distribución muy estrecha del tamaño de partícula, y algunos incluso se reducen a la nanoescala. Esto indica, que las partículas son peligrosas por su composición química, sino también debido a su reactividad y potencial para contaminación de aire, principalmente mientras se produce el proceso en la fabricación de acero.

La composición de la escoria obtenida a partir de la observación con XRF, determinó que el componente principal es el óxido de zinc  $ZnO$ , con 50.48 % del peso total también está presente el óxido de hierro  $Fe_2O_3$ , constituido por 21.15% en peso. Demostrando que son composición típica cuando están galvanizados.

Las imágenes ópticas mostraron, además, las partículas del polvo de EAF distribuidas en la carpeta asfáltica donde se verifica la distribución homogénea, resultado que se esperaba porque el asfalto caliente ayudo a la impregnación de las partículas, confirmando también que el proceso resulta más económico ya que disminuye la cantidad de material propiedades relacionadas con la resistencia y durabilidad.

El punto de ablandamiento e índice de penetración para el asfalto con polvo de EAF tuvieron los siguientes resultados: las muestras aumentaron el punto de ablandamiento, solo la muestra con 10% en peso de EAF se encontró una significativa disminución en esta prueba. Al aumentar la cantidad del polvo de EAF la temperatura aumenta y con ella el reblandecimiento en general, lo cual debe ser bueno para las mezclas que involucran mayores temperaturas. Sin embargo, nuevamente la muestra con 10% en peso de residuos es crítica y rompe la tendencia.

Los resultados de la penetración muestran la tendencia opuesta, es decir cuando mayor es el punto de ablandamiento, más corta es la penetración. Sin embargo, en la investigación se demostró que las muestras elaboradas con polvo EAF se pueden aplicar en la construcción de las carreteras por que los valores siguen el intervalo de 2 a + 2. Únicamente la mezcla con 10% en peso de polvo de EAF puede ser inferior a 2.

Los desechos de EAF son perjudiciales para el medio ambiente debido a su contenido de metales peligrosos, pero esta toxicidad puede estabilizarse utilizándolos en los asfaltos, lo que permite el uso generalizado en la infraestructura de carreteras.

## **2.3 ESCORIA**

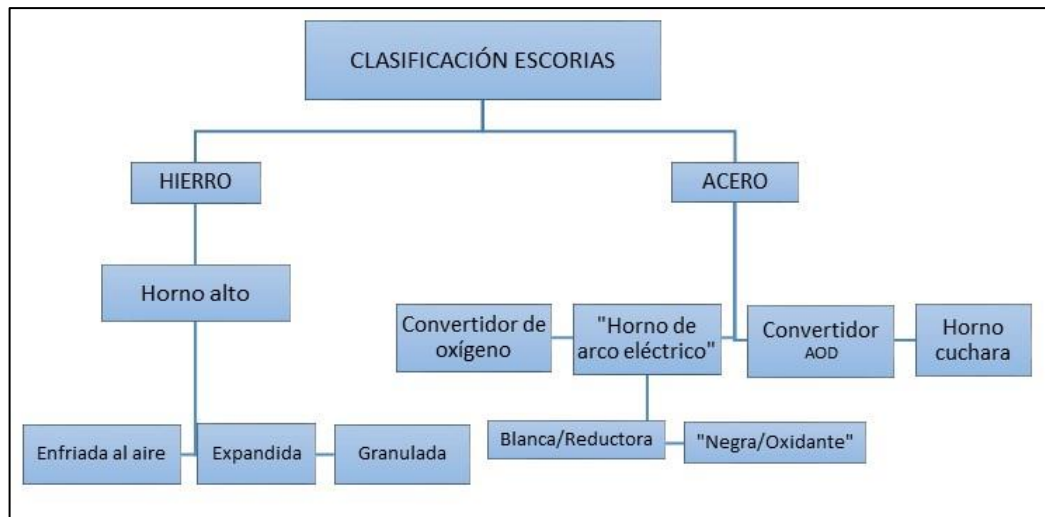
**2.3.1 Escorias siderúrgicas.** Las escorias siderúrgicas son producto del enfriamiento y solidificación de las reacciones químicas entre la materia prima, materiales añadidos al horno y las impurezas de las aleaciones férreas que se producen durante o al final de la fabricación de cualquier metal. Debido a su bajo

punto de fusión y baja densidad, las escorias flotan por encima del caldo férreo. En general, su función es proteger el caldo de la impureza, tales como la entrada de gases, el aislamiento térmico (evitar gradiente de temperatura alto) y la purificación del metal por medio de las reacciones químicas que se producen.<sup>36</sup>

Las escorias pueden provenir de diferentes tipos de metalurgia, como la fabricación del hierro, acero, níquel, magnesio, sobre, entre otros, la función de todas es similar en todos los casos, sin embargo, poseen propiedades físicas y químicas completamente diferentes. Las escorias siderúrgicas se clasifican primeramente dependiendo del material producido como se muestra en la Figura 1. Se muestra la clasificación de las correspondientes a la producción del hierro y del acero. A su vez, el nombre con el que se define cada escoria se deriva de su forma de producción, es decir, del tipo de horno utilizado, sintetizándolas las más importantes en cinco grandes grupos. Ver figura 1

- Alto Horno: Escoria BF.
- Convertidor de oxígeno: Escoria BOF.
- Horno de arco eléctrico: Escoria EAF.
- Horno Cuchara: Escoria LF.
- Convertidor descarburación oxígeno Argón: Escoria AOD.

**Figura 1.** Clasificación de las escorias.



Fuente. La autora, a partir de Amaral, 1999 y Prieto, 2012.

Así pues, las escorias siderúrgicas de arco eléctrico (EAF por sus siglas en inglés) derivadas de la fabricación del acero es el objetivo principal de este estudio con la finalidad de su utilización como material granular en la fabricación de hormigones.

<sup>36</sup> AMARAL DE LIMA, Luciana. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Universitat. Cataluña. España. 1999.

**2.3.2 Horno de arco eléctrico.** El horno de arco eléctrico fue desarrollado por el francés Paul Héroult en EUA en 1907. Estos hornos fueron utilizados durante la segunda guerra mundial para la producción de aleaciones de acero, fue después cuando la fabricación de acero por este método se comenzó a expandir, debido al bajo costo en relación a la capacidad de producción y calidad superior.<sup>37</sup>

El proceso de fabricación de acero mediante el uso de horno de arco eléctrico se divide en dos fases: la primera de fusión y la segunda de afino (mayor pureza del material). La primera consiste, como su nombre lo indica, en fundir mediante tres electrodos de grafito (aplicación de corriente eléctrica) la chatarra con los agentes reactivos y escorificantes. El horno se llena poco a poco hasta completar su capacidad, en esta fase se lleva a cabo la oxidación (eliminación de impurezas de manganeso y silicio), la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas.<sup>38</sup>

Posteriormente, continua la fase de afino que a su vez se divide en dos etapas, primeramente, se analiza la composición del baño fundido para después alimentar el horno con oxígeno puro, cal y cal dolomítica. Así pues, se genera la oxidación del hierro (FeO) y este a su vez oxida al manganeso y silicio, generando reacciones altamente exotérmicas lo que produce un aumento brusco en la temperatura y por ende la reducción del consumo energético. De esta manera, los óxidos de hierro, manganeso y silicio pasar a formar parte de la escoria que cubre el líquido fundido.

Una vez oxidado el silicio y gran parte del manganeso, la escoria presenta un alto porcentaje de FeO libre, por lo que se agrega carbón en polvo para su reducción. Esto genera monóxido de carbono, gas que al desprenderse del líquido facilita la uniformización de la composición, la eliminación de gases y la penetración de la escoria en los electrodos incrementando la eficiencia energética.

La reducción de la ebullición del líquido fundido es un indicador de que la mayor parte de carbono se ha oxidado y la presencia de cal asegura la eliminación del fósforo. De esta manera y a través de estas reacciones se produce lo que se conoce como escoria negra u oxidante, de colores muy oscuros, con aspecto poroso y morfología irregular y fractura puntiaguda.

Finalmente, la segunda etapa de afino consiste en vaciar el acero en un horno cuchara, donde se termina de ajustar la composición del acero y darle la temperatura adecuada, con la finalidad de obtener un metal de bajo contenido en oxígeno y eliminar la mayor parte de azufre. Es aquí donde el líquido fundido se cubre inmediatamente con una escoria blanca o reductora, consiguiendo de esta manera la desoxidación, desulfuración (minimizar la presencia de azufre en el

---

<sup>37</sup> LAPARRA, Maurice. The aluminum false twins, Charles Martin Hall and Paul Héroult's first experiments and technological Options. 2012.

<sup>38</sup> *Ibidem*.

acero) y descarbonación del líquido fundido. Antes de colar el líquido fundido se elimina esta escoria blanca.<sup>39</sup>

En este orden de ideas, las escorias EAF están compuestas principalmente por hierro, calcio, silicio y aluminio, mientras que las escorias blancas poseen una cantidad alta de finos, provenientes del fenómeno de pulverización del silicato bicálcico durante el enfriamiento de la escoria, compuestas de calcio, silicio y bajo contenido de hierro<sup>40</sup>, en general se calcula que la cantidad de escoria producida es proporcional a la cantidad de acero producido.

**Propiedades** En la tabla 1, Se muestran las propiedades físico-mecánicas de las escorias (EAF) que las hacen un material de estudio muy interesante para su uso en aplicaciones constructivas. Se presentan algunas de las propiedades correspondientes a la escoria negra en relación con piedras naturales de altas prestaciones como el basalto y granito, de uso común en la construcción e ingeniería civil.<sup>41</sup> Destacan entre ellas su alta densidad, desgaste y coeficiente de pulido acelerado, esto responde a su alta rugosidad y porosidad en su superficie.

**Tabla 1.** Propiedades físico-mecánicas de las escorias EAF

PROPIEDAD	ESCORIA EAF	BASALTO	GRANITO
Densidad aparente (g/m <sup>3</sup> )	3,50	2,95	2,70
Forma (% partículas alargadas)	<10	---	<10
Coeficiente de absorción de agua (%)	0,3 – 6,0	< 0,5	0,3 – 1,2
Heladicidad (%)	< 0,3	< 0,8	0,8 – 2,0
Incremento de volumen (% vól)	1 – 5	---	---
Desgaste de los Ángeles (%)	12 – 20	9 – 20	12 – 27
Resistencia a compresión (MPa)	> 130	> 250	> 160
Coeficiente de pulido acelerado	54 – 57	45 – 56	45 - 58
Adhesividad a matriz (%)	> 90	---	> 90

Fuente. La autora con base a González, M. 2015.

De otro lado, la composición química de la escoria puede variar dependiendo de la procedencia en referencia a las acerías. Sus principales diferencias son por la utilización de dolomita frente a la cal y la disolución del refractario, produciendo un aumento de la magnesia (MgO) en la escoria. Mientras que los valores de la cal libre (CaO) dependen de la cantidad de cal que se añada en el proceso.

<sup>39</sup> CONTRERAS DE VILLAR, Francisco. Validación de escorias de horno de arco eléctrico mediante su uso como adición en hormigón. 2017. pág. 285.

<sup>40</sup> AMARAL. Op. Cit.

<sup>41</sup> CONTRERAS, Op. Cit. pág. 85.

En la tabla 2. Se presentan los valores típicos de la composición química de la escoria negra según diferentes autores.<sup>42</sup> En general, entre el 75% de la composición química de las escorias negras está compuesta de óxidos de calcio, hierro, silicio y aluminio, en menores cantidades se encuentran óxidos de magnesio y manganeso.

**Tabla 2.** Composición química de la escoria según diferentes autores.

Compuesto	España <sup>1</sup>	España <sup>2</sup>	Italia <sup>3</sup>	Brasil <sup>4</sup>	Alemania <sup>5</sup>	EUA <sup>6</sup>
CaO	25,0 – 33,0	21,8	24,2 -29,5	30,3 – 35,0	32,0	35,0 – 60,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,0 – 46,0	37,6	37,2– 44,8	25,0 – 35,0	31,0	15,0 – 30,0
SiO <sub>2</sub>	10,0 – 16,0	18,3	10,1– 14,7	15,0 – 20,0	15,0	9,0 – 20,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0 – 10,0	8,3	5,7 – 7,2	3,0 – 9,0	4,0	2,0 – 9,0
MgO	3,3 – 6,4	6,1	1,9 – 4,6	8,0 – 12,0	10,0	5,0 – 15,0
MnO	2,0 – 6,5	4,4	5,1 – 5,7	---	4,0	3,0 – 10,0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0 – 2,5	1,8	2,5 – 4,1	---	---	---

Fuente. La autora con base en González, 2015.

La escoria oxidante posee un índice de basicidad cal/sílice de orden 2,5 a 3,0 unidades, y en ella la presencia de cal libre es generalmente muy pequeña. Por otro lado, una parte de la magnesia total está fijada o combinada en otros componentes, sean férricos o sean silicatos y aluminatos; el resto queda como magnesia libre amorfa (no hidratante) o cristalina (periclasa hidratable), la cual aparece en proporciones entre 0% y 5%. El contenido de hierro de la escoria está en torno al 20% - 30% y se encuentra en todos sus estados posibles de oxidación, en forma de Wüstita (Fe<sup>+2</sup>), Hematites (Fe<sup>+3</sup>), y Magnetita (Fe<sup>+8/3</sup>). Su presencia proporciona a la escoria negra una parte muy importante de sus propiedades específicas, como su alta densidad, resistencia al desgaste y a la abrasión (Manso, 2001).<sup>43</sup>

Dichos compuestos definen su composición mineralógica presente en la Tabla 3. La cual se divide en tres grupos, óxidos de hierro, silicatos y compuestos de calcio y magnesio. Sin embargo, la composición mineralógica también depende de la procedencia de la escoria.

<sup>42</sup> GONZÁLEZ, Martha. Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. 2015. pág. 197.

<sup>43</sup> Ibídem.



**Tabla 3.** Composición mineralógica, constituyentes cristalinos.

ÓXIDOS DE HIERRO	SILICATOS	COMPUESTOS DE CALCIO Y MAGNESIO
Wústita FeO	Larnita Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Portlandita Ca (OH) <sub>2</sub>
Hematites Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Merwinita Ca <sub>3</sub> Mg (SiO <sub>7</sub> )	Calcita CaCO <sub>3</sub>
Magnetita Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Clinoenstatita MgSiO <sub>3</sub>	Eventualmente: cal libre CaO; periclusa MgO
	Bredigita (Ca, Fe, Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	

Fuente. Autora con base en Los materiales de la tierra. Ruiz, 2013.<sup>44</sup>.

**Estudios y aplicaciones de la EAF,** Áridos siderúrgicos de horno de arco eléctrico. La utilización de las escorias EAF se ha planteado a partir de su transformación en producto granular estable mediante procesos de machaqueo, separación magnética y cribado. El producto final resultante se conoce con el nombre de “árido siderúrgico de horno de arco eléctrico”. La aplicación de dicho material es en función de sus propiedades y características, además de su estabilidad volumétrica, las cuales han sido objeto de estudio por parte de diferentes autores.<sup>45</sup>, observaron que los áridos muestran textura y morfología diferente dependiendo de su procedencia (en algunos casos puede ser más porosa y en otros más densa y compacta) y también se pueden encontrar partículas con alto contenido de hierro.<sup>46</sup> Por otro lado, define que su color negro y forma son similares en todos los casos y que las características microestructurales están directamente relacionadas con la densidad y las diferentes capacidades de absorber el agua, al tener mayor densidad presentará mayor contenido de hierro.

Al depender de su procedencia, el porcentaje de la composición química, en general, está entre el 87% y 92% de óxidos de Ca, Fe, Al, Si, Mg y Mn. Esta composición no se ve afectada por el tamaño del árido, debido a que los intervalos granulométricos muestran composiciones similares<sup>47</sup>. Es de suma importancia la presencia de CaO y MgO (cuando el porcentaje del último es mayor del 2% aparece como periclusa) debido a que estos componentes pueden ser potencialmente expansivos al hidratarse, sí los contenidos son bajos, presentan estabilidad volumétrica.

<sup>44</sup> RUIZ DE ALMODÓVAR, Sel Gabriel. Los Materiales de la tierra. 2013. pág. 146–54.

<sup>45</sup> LUXÁN, M. P., R.; SOTOLONGO, F.; DORREGO; HERRERO, E. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace." Cement and Concrete Research. 30(4). 2000. pág. 517-519.

<sup>46</sup> ORTIZ G; CASTRO M, Elías X, SANMARTÍN, R. Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico. Residuos (Bilbao) 1996; pág. 66-70.

<sup>47</sup> FRÍAS, M., J. T. SAN-JOSÉ, y VEGAS, I. “Árido Siderúrgico en Hormigones: Proceso de Envejecimiento y Su Efecto En Compuestos Potencialmente Expansivos.” Materiales de Construcción 60 (297). 2010. pág. 33–46. Disponible: <https://doi.org/10.3989/mc.2019.45007>.

El contenido de CaO de los áridos estudiados por Frías y Sánchez, 2004, no presentan actividad puzolánica y el contenido se mantiene prácticamente constante después de 90 días de ensayo. Así mismo,<sup>48</sup> confirman que el proceso de envejecimiento produce una reducción efectiva en los contenidos de los compuestos expansivos durante los primeros 45 días, estabilizándose a partir de ese momento.

En relación a su composición mineralógica, presenta óxidos de hierro en forma de plusita, magnetita, hematita, silicatos (larnita, merwinita y gehlenita), la cantidad también depende de la procedencia y de cada muestra (árido) (Frías y Sánchez, 2004; Luxán et. ál., 2000), citado por Frías.<sup>49</sup> Por otro lado, mediante sus resultados indican que los metales están estrechamente unidos y no se liberan de la matriz, incluso bajo condiciones ácidas. Así mismo, de análisis de agua procedentes de lixiviaciones muestran que dichos áridos muestran una baja concentración de metales y todos los valores obtenidos se encuentran dentro de los límites<sup>50, 51</sup> no observan problemas de desintegración, rotura e inestabilidad, resumiendo su posible uso como material en el sector de la construcción. Se realizó también, una evaluación técnica según la cual la alta angulosidad y resistencia al impacto y pulimiento de la escoria negra le confieren unas propiedades idóneas para su utilización

**Utilización en la industria del cemento.** Una de las aplicaciones propuestas es su uso para la fabricación de cemento, el control de calidad del material para esta aplicación, es mediante la determinación de metales presentes en el clínker elaborado, ensayo de expansión y su índice de actividad puzolánica, así como la resistencia a compresión a 28 días (Geyer et. ál., 1997; Muhmood et. ál., 2009; Murphy et. al, 1997; Sawadde, 1997; Sheen et. ál., 2013; Shi, 2004),<sup>52</sup> Según Geyer et. ál., 1997, al sustituir un 35% de cemento por escoria la expansión es nula y el índice de actividad puzolánica de un 70%, así mismo, define que cuando se utiliza granulometría inferior a 0,074 mm no tiene afectación en la resistencia a compresión (24,3 MPa). Sin embargo, para que la carbonatación sea menor y en consecuencia la durabilidad del material sea buena es recomendable una sustitución del 5% en la misma granulometría

En otro estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia, por el ingeniero

---

<sup>48</sup> *Ibíd.*

<sup>49</sup> *Ibíd.*

<sup>50</sup> PROCTOR DM; FEHLING, KA; SHAY EC, Wittenborn JL, Green JJ, Avent C, Bigham RD, Connolly M, Lee B, Shepker TO, Zak MA. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science & Technology* 2000; pág. 1576-1582.

<sup>51</sup> LUXAN. OP. Cit. pág. 517-519.

<sup>52</sup> GONZÁLEZ, Martha. Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. 2015. pág. 197.

Cárdenas, se estudiaron tres tipos de escoria (EHE; ERE; Y ERF) de una empresa metalúrgica de Córdoba.<sup>53</sup>, para evaluar su posible uso como adición en el cemento Pórtland desde la perspectiva puzolánica e hidráulica latente.

En su investigación determinaron resistencias mecánicas a diferentes edades según la norma ASTM C-109 y NTC 220, sus resultados muestran que las escorias EHE y ERE son aptas para su uso como puzolanas en sus resistencias a 7 y 28 días. La escoria ERF obtuvo buenas resistencias a 7 días, pero a 28 días no supero el límite de 75% de resistencia, por esta razón no la considero apta para su uso como puzolana.

**Firmes de carreteras.** Las escorias negras se han empleado, tradicionalmente en firmes de carretera, debido a su porosidad, angulosidad y falta de finos puede resultar un material incómodo durante los trabajos de extensión y compactación, por lo que suelen combinarse con áridos naturales para mejorar estos aspectos. Las experiencias previas existentes, muestran que un adecuado tratamiento y una clasificación y selección de las escorias en planta, pueden proporcionar sin problemas áridos de calidad para ser utilizados en la consolidación de suelos, capas granulares de carreteras, plataformas de vías de comunicación, caminos o vías férreas.<sup>54</sup>

Ello responde a que estos áridos poseen un buen coeficiente de los Ángeles y un excelente coeficiente de pulimiento acelerado con resistencia al desgaste y abrasión que los hace especialmente utilizables para estas aplicaciones [Jones, 2001; Piret et. ál., 1982]. Por otro lado, la composición química y el carácter básico de los áridos garantizan una buena adhesividad d con los betunes convencionales y en mezclas bituminosas.<sup>55</sup>.

**Otras aplicaciones.** Existen otras aplicaciones puntuales entre ellas, su empleo en obras fluviales (con tamaño de partículas superior a 10 mm) como escollera fina de relleno, cubierta después con escollera más gruesa (Geiseler y Schlösser, 1986). En dicho empleo, la estabilidad volumétrica es rigurosamente necesaria, así como la inocuidad de sus compuestos solubles en agua, no obstante, este ha sido un empleo minoritario y puntual. Otro fue un intento de usarlo mezclado con restos de incineración de residuos urbanos (Bäverman et. ál., 1997), aplicación poco habitual de la escoria negra, entre los que destaca por su originalidad. Así mismo, se estudió como material fijador de fósforo en la depuración de aguas o fertilizantes<sup>56</sup>.

---

<sup>53</sup> CARVAJAL VINASCO, Juan Felipe. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. 2012. pág. 135.

<sup>54</sup> GONZÁLEZ, Op. Cit. pág. 197.

<sup>55</sup> PASETTO, Marco, y BALDO, Nicola. "Recycling of steel slags in road foundations." *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (6). 2010. pág. 773–77.

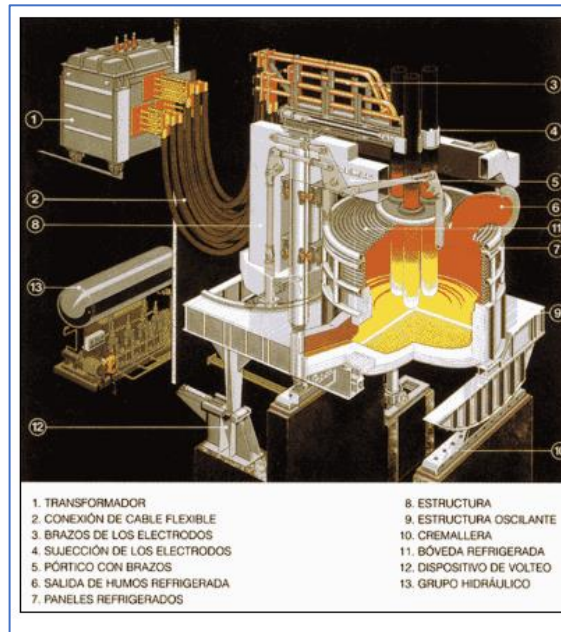
<sup>56</sup> VALLET B, Comeau Y, BOUVRETTE J, Parent S. Dephosphatation de l'eau par des scories d'aciérie. Biodôme de Montreal, Canada. 2002

Finalmente, Bantsis et. ál., 2012 fabricaron morteros con árido siderúrgico de escoria negra y de escoria blanca, así como, morteros con desechos de llantas. Con la finalidad de comparar la capacidad de absorción electromagnética de rayos X (frecuencia entre 8 y 12 GHz). Los resultados mostraron, que los correspondientes a los morteros con áridos metalúrgicos obtienen una eficacia mayor al blindaje que los fabricados con desechos de llantas. Así mismo, presentaron aumentos en las resistencias mecánicas, contrario a lo observado por los morteros con desechos de llantas.

## 2.4 PROCESO SIDERÚRGICO

El proceso del horno eléctrico se basa en el empleo de chatarra, pero se ve limitado por la escasez de chatarras limpias, por tal razón, existe la necesidad de encontrar los prereducidos de hierro, en base a la reducción directa en fase sólida de minerales de hierro, con agentes reductores, tales como gas natural o carbón.<sup>57</sup>, el proceso es la fusión de la carga (chatarra, prereducidos, arrabio) por calor producido por el arco eléctrico establecido en los electrodos y dicha carga. Es el sistema que permite un reciclaje masivo de la chatarra. Ver la figura 2

**Figura 2.** Horno de arco eléctrico



Fuente. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid. Disponible (webaero.net, s.f.).

<sup>57</sup> PAYNO HERRERA, María Luisa, y MARQUÍNEZ, Jesús Setién. Metalurgia y Siderurgia 4. siderurgia acero: generalidades propiedades." Universidad de Cantabria. Departamento de ciencia e ingeniería del terreno y de los materiales. 2013

**Componentes del horno eléctrico.** Cuba del horno con dispositivo de colada y sistema de cierre, sistema de vuelco (colada), bóveda giratoria refrigerada por agua, electrodos de grafito que atraviesan la bóveda y establecen el arco eléctrico a partir del paso de la corriente eléctrica, brazos porta electrodos y depuración de humos.

El proceso del horno eléctrico se inicia con la carga de la chatarra, después mediante conexión de la corriente eléctrica se inicia el proceso de fusión, sigue la inyección de oxígeno y la defosforación. Y finalmente calentamiento y colada. Las ventajas del proceso en horno de arco eléctrico son: fabricación de cualquier tipo de acero en función del tipo de carga, amplia versatilidad de carga, baja inversión, comparada con el proceso integral, alta eficiencia del proceso, facilidad de control y automatización.<sup>58</sup>

**2.4.1 Historia del acero en Colombia.** En Colombia, los primeros pasos de la industria siderúrgica datan del siglo XX. En 1920 nace la ferrería de Pacho con los primeros descubrimientos de yacimientos de mineral de hierro, luego en 1930 aparece la siderúrgica de Medellín hoy SIMESA, en 1938 nace siderúrgica S.A, 1947 creación de la siderúrgica Muña S.A, 1948 se inició la construcción de la primera planta con alto ahorno y laminación del país. En ese mismo año es el nacimiento de Acerías Paz del Río, única siderúrgica que produce acero a partir de mineral de hierro, en 1961 aparece Metal Boyacá, conocida como siderúrgica de Boyacá, 1966 nace Aceros Ramson, en primera empresa en el Parque Industrial de Sogamoso, para el año 1968 se funda Armaduras Heliacero, en 1970 se creó Laminados Andinos, dos años más tarde en 1972 aparece Diaco (distribuidora de aceros de Colombia), Luego en 1972 con el propósito de producir platinas aparece Distriaceros, luego en 1980 se creó Trefilados de Caldas para la producción de puntillas y varillas, en 1981 se fundó Acerías Sogamoso, actualmente siderúrgica Nacional SIDENAL S.A., en 1987 nace siderúrgica de Occidente , en 1992 se creó la siderúrgica de Caldas, 1993 nace en Sogamoso la empresa de Hornos Nacionales HORNASA, en el año 2001 se presenta la consolidación de Diaco S. A. conformado por Siderúrgica de Boyacá, Siderúrgica del Caribe, Empresa Armaduras Hellacero S.A., Siderúrgica del Muña, Distribuidora de Aceros Colombianos, Siderúrgica de Medellín y Laminados Andinos, en el año 2005 ingreso a Colombia Gerdau que hoy se conoce como Gerdau Diaco, dentro del desarrollo del proceso de internacionalización, el grupo brasilero Votorantim Siderurgia adquirió la mayoría accionaria de Acerías Paz del Río en el año 2007, en el año 2010 Ternium adquirió el 54% del grupo colombiano Ferrasa- la transacción terminó en 2015 cuando completó la adquisición del porcentaje restante. Hacia el año 2011 se da la conformación del grupo empresarial SIDOC, del que hace parte cementos San Marcos, así mismo, nace en Sogamoso la empresa Grupo Siderúrgico Reyna,

---

<sup>58</sup> Ibídem.

hoy en día cuenta con la planta de laminación de barras más moderna del país. Posteriormente, en 2014 inicia operaciones Mallas Tocancipá. En 2015 Ternium adquiere el porcentaje restante de Ferrasa. Finalmente, en 2017, se da la unificación de sociedades bajo la marca y razón social Ternium Colombia y Ternium Sidecaldas, SIDOC S.A.S. inicia producción en la nueva planta y cierra Laminamos S.A.S., por su parte, Gerdau Diaco se consolidó como el Joint Venture Gerdau Diaco-Putney.<sup>59</sup>

**2.4.2 Proceso siderúrgico en Colombia.** Al revisar el trabajo que conlleva a constituir una industria que le apuesta a la construcción del país, a sus edificaciones y a su infraestructura como eje de desarrollo se hace necesario visibilizar y materializar en qué consiste el proceso productivo y la magia de la siderurgia. El acero en Colombia se produce a través de dos procesos: el proceso siderúrgico integrado y el proceso siderúrgico semi-integrado. La industria siderúrgica comprende la fabricación de productos primarios a partir de mineral de hierro. Este, a través de un proceso de reducción, se convierte en prereducidos de hierro, ya sea en alto horno u horno de reducción directa. Los productos del alto horno son: arrabio, granalla y lingotes de hierro bruto colado o esponja. El acero se obtiene mediante un proceso de oxigenación de los prereducidos que se lleva a cabo en los convertidores al oxígeno. Las formas que adquiere el acero después del baño de oxígeno en el oxiconvertidor son: lingotes, llantón, palanquilla, acero en bloques y aceros especial.<sup>60</sup>

**2.4.3 Gerdau Diaco S.A.** Es la siderúrgica de mayor presencia a nivel nacional, cuenta con plantas de producción de aceros largos, malla electro soldada, servicio de corte y doble y puntos de distribución localizados en 17 departamentos del país, con el objetivo de ofrecer a sus clientes un servicio integral con el más amplio portafolio de productos para el sector de la construcción y la industria. La empresa está altamente comprometida con la sostenibilidad y trabaja día a día para contribuir e invertir en la sociedad y en el cuidado del ambiente, siendo el principal reciclador de chatarra ferrosa del país. Además, cuenta con la certificación ISO 14001, como parte de su gestión ambiental. Dentro de la estrategia del negocio, desarrolla prácticas innovadoras y sustentables, con el objetivo de generar valor a todos sus grupos de interés.

---

<sup>59</sup> WORLDSTEEL, ASSOCIATION. Steel Industry Co-Products. 2018.

<sup>60</sup> EL TIEMPO, Proceso siderúrgico. publicación 26 de mayo, 2017.

## 2.5 MATERIALES PARA CONCRETOS ASFÁLTICOS

**2.5.1 Mezclas asfálticas.** Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico. (Rondón 2013), se elaboran normalmente en plantas mezcladoras, pero en algunos casos pueden fabricarse in situ. Algunas mezclas asfálticas son:

- Mezclas abiertas en frío.
- Mezclas abiertas en caliente.
- Mezclas densas en frío.
- Concreto asfáltico o mezcla densa en caliente.
- Arena-asfalto.
- Tratamientos superficiales.
- Lechadas (Shurry and Seal)
- Mezclas asfálticas drenantes.
- Mezclas discontinuas o microaglomerados en caliente.
- Mezclas tibias.
- Mezclas asfálticas modificadas.
- Materiales granulares estabilizados con asfalto en frío o caliente.

**2.5.2 Concreto asfáltico.** Conocidos también como mezclas densas en caliente de gradación continua, según tabla 450-1 del INVÍAS su denominación es: MDC (mezclas densas), MSC (mezclas semidensas), MGC (mezclas gruesas), MAM (mezclas de alto módulo) – mezclas especiales. Internacionalmente son conocidas como mezclas HMA (Hot Mix Asphalt). Estas mezclas deben fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura su temperatura debe estar entre 140°C y 180°C aproximadamente, dependiendo de la viscosidad del asfalto, otra característica es el bajo contenido de vacíos con aire en volumen (entre 3% y 9%), el agregado pétreo utilizado para la elaboración de la mezcla de concreto asfáltico debe cumplir con la granulometría y calidad de las tablas de las últimas especificaciones.<sup>61</sup>

**2.5.3 Cemento asfáltico.** El cemento asfáltico es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno.<sup>62</sup> . El cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (Asphalt

---

<sup>61</sup> INVÍAS. 2013. “Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.” Bogotá D.C. 2013

<sup>62</sup> INVÍAS. 2013. “Sección 700 y 800 Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos, primera parte.”

Cement en países anglosajones) y se clasifican por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad. En Colombia su clasificación se rige de acuerdo a la norma INVÍAS (INV. E-706-13, ASTM D-5) para la penetración, y consiste en la resistencia que experimenta el CA cuando se permite penetrar en él una aguja normalizada de 100 g de masa durante cinco segundos a una temperatura estándar de 25°C. Es decir, de manera directa mide la consistencia del cemento asfáltico y de manera indirecta la rigidez. Es decir, que, bajo las mismas condiciones de ensayo, el CA más rígido será aquel en el cual la aguja penetre menos. Esta penetración se evalúa en 1/10 de mm, se mide en un penetrómetro.<sup>63</sup>

Los grados de penetración se conocen frecuentemente como 40-50,60-70 u 80-100, de acuerdo con las características de la mezcla y el proyecto, y además que cumplan con los requisitos de calidad establecidos por el INVÍAS, en la tabla 4 se muestran las especificaciones del cemento asfáltico.

**Tabla 4.** Especificaciones del cemento asfáltico

CARACTERÍSTICAS	NORMA DE ENSAYO INVIAS	GRADO DE PENETRACIÓN	
		60-70	
		MÁXIMO	MÍNIMO
Asfalto original			
Penetración (25°C,100g,5s),0.1mm	E-706	60	70
Punto de ablandamiento °C	E-712	48	54
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland °C	E-709	-	0.2
Viscosidad absoluta (60°C), P	E-716 o E-717	150	-
		0	
Ductilidad (25°C,5cm/min	E-702	100	-

Fuente. la autora con base a, INV E-700 – 2013.

Con respecto al nivel de tránsito que deben soportar las mezclas en el pavimento, es recomendable cuando son altos volúmenes de tránsito, utilizar CA 60-70 o CA 40-50 para las mezclas asfálticas en caliente. A continuación, se presentará una descripción detallada de cada parámetro

- Índice de penetración (IPen). se evalúa el grado de susceptibilidad térmica del asfalto. Para determinar el IPen es a través de las ecuaciones 1,2,3;

$$Pen = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (1)$$

<sup>63</sup> RONDÓN, Hugo. Asfaltos y mezclas asfálticas. Editorial, ECOE. Santafe de Bogotá. 2013



$$A = \frac{\log(\text{pen}T_1) - \log(\text{pen}T_2)}{T_1 - T_2} \quad (2)$$

$$IPen = \frac{20PA + 500\log(P) - 1952}{PA - 50\log(P) + 120} \quad (3)$$

Donde:  $\text{pen}T_i$ , en 0.1 mm es la penetración a la temperatura  $T_i$  en °C; P es la penetración a 25°C en 0.1 mm; PA es el punto de ablandamiento en °C.

- La viscosidad: se entiende como la resistencia que tiene un material a fluir sobre una superficie. La viscosidad ofrece una medida indirecta de la consistencia y rigidez del CA, siendo por lo general el más rígido el cemento asfáltico el que experimente mayor viscosidad. Se representa en una curva típica de evolución de la viscosidad con la temperatura.
- Punto de ablandamiento: es el parámetro que se mide empleando el equipo llamado anillo y bola. Mide la temperatura a la cual el CA cambia de estado sólido al estado en el cual fluye como si fuera un líquido.
- Ductilidad: según la norma INVÍAS 702-13 el procedimiento consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de la rotura. Se mide con un ductilímetro.
- Punto de ignición e inflamación: determina los puntos de ignición y de llama, utilizando la copa abierta de Cleveland a los productos de petróleo y de otros líquidos con excepción de los aceites combustibles y de los materiales que tienen un punto de ignición por debajo de 79°C (175°F), empleando el equipo manual o el equipo automático (INVIAS 2013b).

**2.5.4. Agregados pétreos.** Los agregados pétreos en pavimentos se refieren a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas y finos y/ filler (naturales o triturados), dentro de la estructura de pavimento con capa asfáltica, los agregados pétreos más exigentes, en cuanto a durabilidad, textura y resistencia mecánica están aquellos que conforman las mezclas asfálticas.<sup>64</sup> En las mezclas asfálticas los agregados son los encargados de soportar las cargas impuestas por el parque automotor y transmitirla en menores proporciones a las capas subyacentes. Los agregados pétreos deben poseer una granulometría adecuada junto con requisitos mínimos de calidad para su buen desempeño dentro de la mezcla. En la tabla 5, se

---

<sup>64</sup> *Ibidem*.

referencia la franja granulométrica para una mezcla MDC-19.

**Tabla 5.** Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua MDC-19.

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm/U.S.Standard)										
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075	
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200	
DENSA	%PASA										
	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	14-25	9-19	5-10

Fuente. La autora, a partir de las especificaciones para gradación continua, INVÍAS Art.450 – 2013

Los agregados pétreos deben cumplir con las especificaciones requeridas por el Instituto Nacional de Vías INVÍAS -2013. A continuación, en la tabla 6 se muestran los requisitos de los agregados para MDC.

**Tabla 6.** Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

CARACTERÍSTICAS	NORMA DE ENSAYO INVÍAS	NIVEL DE TRANSITO		
		NT1	NT2	NT3
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles Capa de rodadura/intermedia/base,500 rev. Capa rodadura/intermedia /base, 100 rev.	E-218	25/35/- 5/7/1	25/35/35 5/7/7	25/35/35 5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Macro Deval, capa de rodadura/intermedia /base	E-238		25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de rodadura/intermedia/base - Relación húmedo/seco / mínima (%)	E-224			110/90/75 75/75/75
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregado fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%) -una cara: rodadura/intermedia/base - dos caras: rodadura/intermedia/base	E-227	75/60/- -/-	75/75/60 60/-	85/75/60 70/-
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%). - capa de rodadura/intermedia/base	E-227	40/35/1	45/40/35	45/40/35

Fuente. La autora, a partir de las especificaciones para requisitos de los agregados pétreos de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua, INVÍAS, art.450 - 2013.

## Descripción de los ensayos que se requieren para los materiales pétreos:

- Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles: se realiza con teniendo un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, mide la resistencia a la abrasión o desgaste por fricción de las partículas. En este proceso las partículas impactan en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, a medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas de acero y las arrastra hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, creando el efecto impacto y trituración. Tras el número especificado de revoluciones el ciclo se repite y finalmente se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir la degradación, como un porcentaje de pérdida. (INVÍAS, 2013).
  
- El ensayo se ha usado como indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas.
  
- Degradación por abrasión en el equipo Micro Deval: es una medida de la resistencia a la abrasión y la durabilidad de agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua. La muestra con granulometría normalizada se sumerge en agua durante un lapso de tiempo no menor a una hora, luego se coloca en un recipiente de acero de 20 cm de diámetro, con 2.0 litros de agua y una carga abrasiva, consistente en 5000 g de esferas de acero de 9.5 mm de diámetro. Recipiente, agregado, agua y carga rotan a 100 rpm hasta por dos horas. Posteriormente se lava la muestra y se seca al horno. La pérdida es la cantidad de material que pasa por el tamiz 1.18 mm (No.16), expresada como porcentaje de la masa seca original de la muestra.
  
- Los resultados del ensayo permiten determinar la pérdida de abrasión de los agregados gruesos en presencia de agua y una capa abrasiva.<sup>65</sup>
  
- Resistencia mecánica por el método del 10% de finos: una muestra de agregado de tamaño especificado, se somete a compactación en un cilindro metálico, aplicando golpes con una varilla. Una vez compactada la muestra se somete gradualmente a esfuerzos de compresión, las partículas de la muestra se van fragmentando en una cuantía que depende de su resistencia al aplastamiento. luego la muestra se pasa por el tamiz de 2.36 mm (No.8). El proceso se realiza con varias cargas de compresión, para establecer la carga con la cual se produce en el agregado un 10% de finos.

---

<sup>65</sup> INVÍAS. Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2012

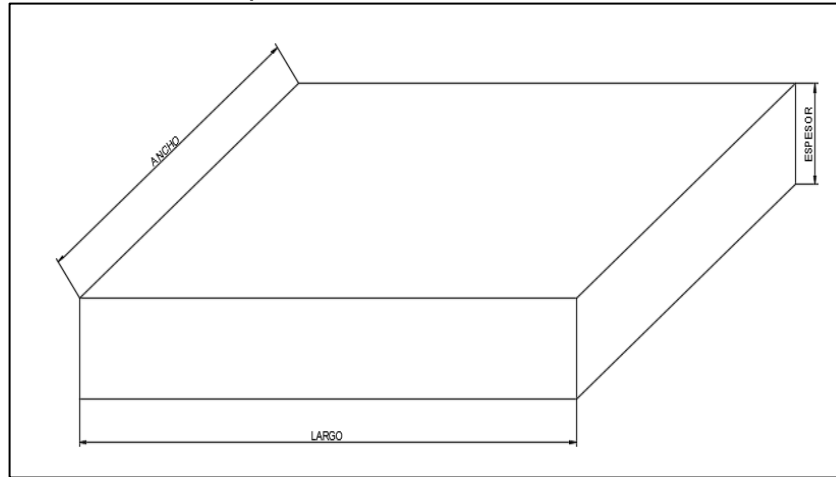
- Este ensayo simula los esfuerzos de los materiales del pavimento asfáltico debido a las cargas del tránsito. El ensayo del 10% de finos contribuye a la evaluación del comportamiento de un agregado pétreo cuando se somete a degradación mecánica.<sup>66</sup>
- Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregado fino y grueso: determina la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie y concretos y otras aplicaciones. Este efecto se simula sometiendo los agregados a inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio, seguida de secado al horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables de las partículas del agregado. La fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal después de reinmersión, simula la expansión del agua por congelamiento. Este método permite juzgar la resistencia de los agregados a la acción de los agentes atmosféricos, cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climatológicas reales de servicio.<sup>67</sup>
- Partículas planas y alargadas: esta norma sirve para determinar el porcentaje de partículas planas, alargadas o planas y alargadas, e un agregado grueso.
- Definiciones: Partículas planas de un agregado: son aquellas partículas del agregado que tienen la relación espesor/ancho mayor a un valor especificado.
- Partículas alargadas de un agregado: son aquellas partículas del agregado que tienen una relación entre largo/ancho mayor que un valor especificado.
- Partículas planas y alargadas de un agregado: son aquellas partículas que tienen una relación entre largo/espesor mayor a un valor determinado.
- Caras fracturadas: una superficie angulosa, áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración, por otros medios artificiales o por la naturaleza.
- En la figura 3 se realizó un esquema que muestra las dimensiones de una partícula.

---

<sup>66</sup> *Ibidem.*

<sup>67</sup> *Ibidem.*

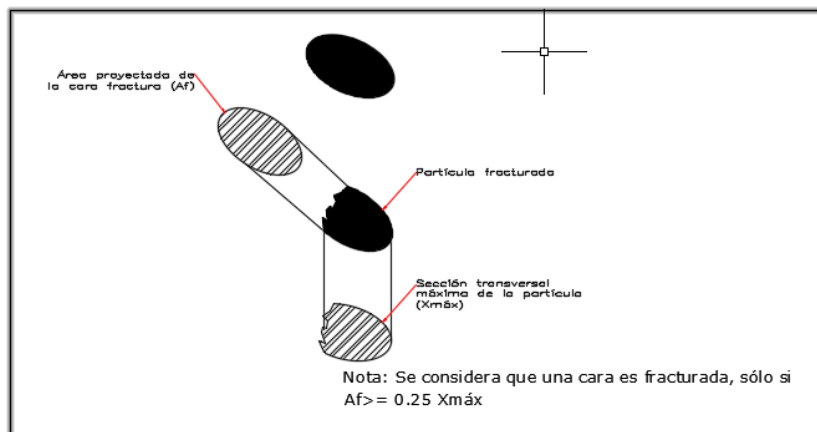
**Figura 3.** Dimensión de una partícula



Fuente. La autora, a partir del ejemplo de dimensiones de las partículas de agregado grueso, gráfica INVÍAS, art.450, 2013.

– Se considera una cara fracturada, solamente si tiene un área proyectada al menos tan grande como un cuarto de la máxima área proyectada (sección transversal máxima) de la partícula (excluyendo pequeñas mellas) y dicha cara tiene bordes cortantes o ligeramente despuntados. Uno de los propósitos de este requisito es maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados. Además de dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura a los agregados usados en la construcción de capas de rodadura.<sup>68</sup> Ver figura No. 4.

**Figura 4.** Esquema de una cara fracturada



Fuente. La autora con base en, gráfica INVÍAS, art.450, 2013.

<sup>68</sup> Ibídem.

– Angularidad de la fracción fina: esta norma se refiere a la determinación del contenido de vacíos de una muestra de agregado fino no compactada. El contenido de vacíos indica la angulosidad, la esfericidad y la textura superficial del agregado, que se puede comparar con la de otros agregados finos ensayados con la misma gradación, en un recipiente cilíndrico calibrado de 10 ml nominales se llena con un agregado fino, permitiendo que la muestra fluya a través de un embudo desde una altura fija dentro del recipiente. El agregado fino se extrae del recipiente y se pesa para determinar su masa. El contenido de vacíos sin compactar se calcula como la diferencia entre el volumen del medidor cilíndrico y el volumen absoluto del agregado fino recogido en el medidor. Para los cálculos se usa la densidad relativa seca (gravedad específica) del agregado fino. Se hacen dos medidas de cada muestra y se promedian los resultados.<sup>69</sup>

– Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino: se usa para determinar la densidad de la porción esencialmente sólida de un gran número de partículas de agregado y suministra el valor promedio que representa la muestra. En este ensayo se sumerge en agua una muestra del agregado durante un período de  $24 \pm 4$  h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, la muestra (o una parte de ella) se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen por el método gravimétrico o el volumétrico. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca. Usando los valores de masa obtenidos y las fórmulas incluidas en esta norma, es posible calcular la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.<sup>70</sup>

– Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso: esta norma permite determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. En este ensayo se sumerge en agua una muestra del agregado durante un período de  $24 \pm 4$  h, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, la muestra (o una parte de ella) se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen por el método gravimétrico o el volumétrico. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca. Usando los valores de masa obtenidos y las fórmulas incluidas en esta norma, es posible calcular la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.<sup>71</sup>

---

<sup>69</sup> *Ibidem.*

<sup>70</sup> *Ibidem.*

<sup>71</sup> *Ibidem.*

## 2.6 METODOLOGÍA RAMCODES

Es una metodología racional, basada en experimentos factoriales, en conceptos de la Mecánica de Suelos no Saturados, y en la experiencia práctica de diseño y control, para análisis de densificación y resistencia de Geomateriales, esto es suelos, mezclas y mezclas asfálticas, compactados. El pionero en desarrollar esta tecnología fue el ingeniero Freddy J. Sánchez-Leal en el año 1998.

Ramcodes significa: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactado.

La metodología está basada en un experimento factorial de dos niveles o factores, a saber: el contenido de asfalto (CA) y el peso específico bulk ( $G_{mb}$ ). Como geomaterial, el comportamiento de resistencia y deformabilidad de una mezcla asfáltica puede ser estudiado bajo la concepción de Coulomb de cohesión y fricción. El peso específico bulk es una medida directa de la fricción de las partículas; y el contenido de asfalto es una medida de la cohesión. Estas dos variables comúnmente son utilizadas en el control de compactación de las mezclas en el campo.<sup>72</sup>

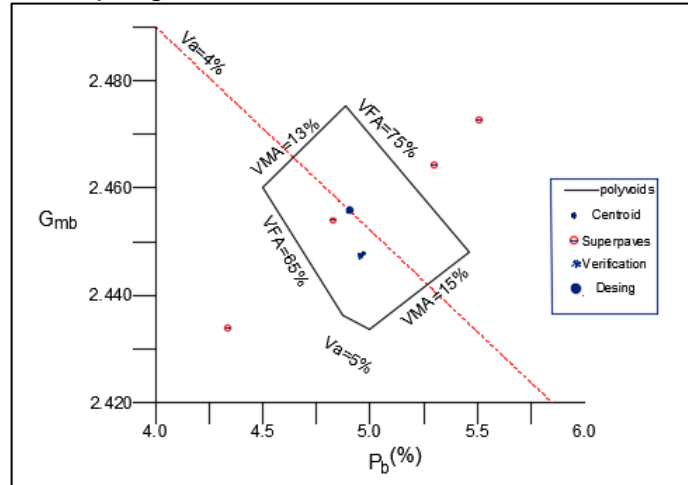
**2.6.1 Ramcodes en mezclas asfálticas.** El objetivo principal de la metodología es disminuir el tiempo de respuesta en el diseño de mezclas asfálticas. Desde el 2001 Ramcodes desarrollo una herramienta analítica llamada polígono de vacíos (polyvoids), que específicamente acorta el tiempo en el análisis volumétrico, y se puede aplicar con éxito en los métodos Marshall y en el Superpave.

El polígono de vacíos es el área más grande, dentro del espacio contenido de asfalto ( $P_b$ ) versus peso unitario bulk ( $G_{mb}$ ), donde se cumplen simultáneamente todas las especificaciones de vacíos. Así se obtiene el contenido óptimo de asfalto, llamada fórmula de trabajo, únicamente a partir de las especificaciones de vacíos. En la figura 5 se ve el esquema que muestra el polígono de vacíos mostrando las isolíneas necesarias para su construcción.

---

<sup>72</sup> SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. RAMCODES de Venezuela, C.A. 2009. pág. 1: 20.

**Figura 5.** Esquema de polígono de vacíos



Fuente. Autora con base en aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.<sup>73</sup>

A continuación, el ingeniero Sánchez- Leal, describe como se debe construir un polígono de vacíos a partir de las fórmulas matemáticas de las definiciones de vacíos. Así, vacíos de aire (VA), vacíos en el agregado mineral (VAM), y vacíos llenados con asfalto (VFA), los cuales aparecen en las normas del INVIAS y demás manuales de pavimentos conocidos. Los vértices del polígono surgen de la intersección correspondiente a los niveles máximos y mínimos requeridos por las especificaciones de vacíos. El contenido óptimo de asfalto del polígono se obtiene como el centroide del área producida por estas intersecciones.

**2.6.2 Información necesaria para construir el polígono de vacíos.** El polígono de vacíos usa las mismas fórmulas para el análisis volumétrico que usa la metodología Marshall y Superpave, establecidos en las normas Invias en la norma INV E-799-13; la gran diferencia radica en que las dos metodologías usan seis curvas típicas de diseño (construidas a partir del ensayo de 12 a 15 briquetas) para encontrar el contenido óptimo de asfalto, mientras con el uso del polígono de vacíos lo que hace es resumir esas tres curvas en un solo gráfico sin preparar una sola briqueta, solo es necesario las gravedades específicas y los límites de las especificaciones de vacíos.

Convenciones:

Pesos específicos

- $G_{mb}$ : gravedad específica bulk de la mezcla
- $G_{mm}$ : gravedad específica máxima media de la mezcla

---

<sup>73</sup> *Ibidem*.



- $G_{mt}$ : gravedad específica máxima teórica de la mezcla
- $G_b$ : gravedad específica del asfalto
- $G_{sb}$ : gravedad específica bulk de los agregados
- $G_{sa}$ : gravedad específica aparente o nominal del agregado

#### Volúmenes

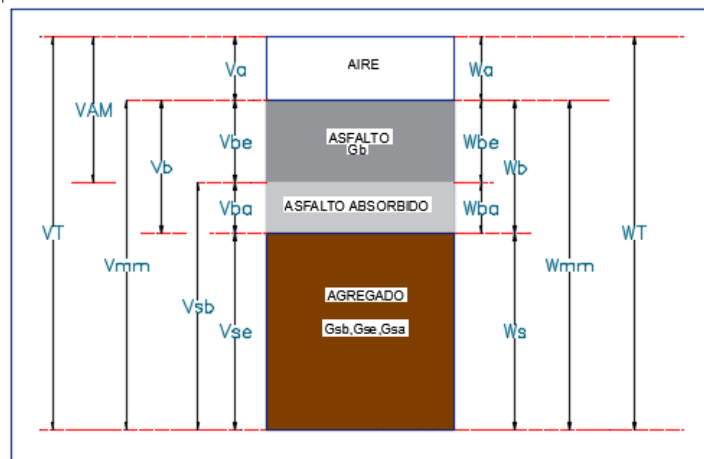
- VAM: porcentaje de vacíos en el agregado mineral
- VFM: porcentaje de vacíos llenos de asfalto
- $V_{mm}$ : volumen máximo medido de la mezcla
- VT: volumen total
- $V_a$ : volumen de aire
- $V_b$ : volumen de asfalto
- $V_{sb}$ : volumen del agregado y asfalto absorbido
- $V_{se}$ : volumen efectivo de los agregados
- $V_{ba}$ : volumen absorbido de asfalto
- $V_{be}$ : volumen efectivo de asfalto

#### Pesos

- WT: peso total de la muestra
- $W_a$ : peso del aire
- $W_b$ : peso del asfalto
- $W_s$ : peso del agregado
- $W_{be}$ : peso efectivo del asfalto
- $W_{ba}$ : peso absorbido del asfalto

A continuación, la figura 6 muestra los componentes de una mezcla asfáltica compactada, parámetros fundamentales en la elaboración del polígono de vacíos.

**Figura 6.** Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada



Fuente. Autora a partir de la norma INV E-799-13

Gravedad específica bulk del agregado ( $G_{sb}$ ): es la relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen del agregado, incluyendo los vacíos permeables e impermeables, y la masa de un igual volumen de agua destilada libre de gas, ambos a la misma temperatura establecida. Su valor es adimensional. Ver figura 6, y el cálculo se efectúa teniendo en cuenta la ecuación 4

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{A}{G_{saA}} + \frac{B}{G_{saB}} + \frac{C}{G_{saC}}} \quad (4)$$

Donde:  $G_{sb}$ : gravedad específica bulk de la combinación de agregados, A: porcentaje del material A, B: porcentaje del material B, C: porcentaje de material C,  $G_{saA}$ : gravedad específica del material A,  $G_{saB}$ : gravedad específica del material B,  $G_{saC}$ : Gravedad específica del material C

Gravedad específica aparente del agregado ( $G_{sa}$ ): es la relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de la parte impermeable del agregado, y la masa de un igual volumen de agua destilada libre de gas, ambos a la misma temperatura establecida. Su valor es adimensional. Ver figura 6 el cálculo se efectúa teniendo en cuenta la ecuación 5.

$$G_{sa} = \frac{100}{\left(\frac{A}{G_{saA}}\right) + \left(\frac{B}{G_{saB}}\right)} \quad (5)$$

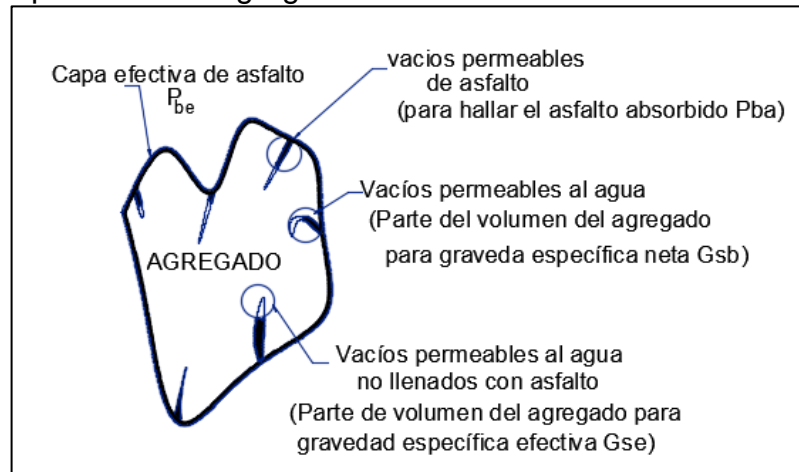
Donde:  $G_{sa}$ : gravedad específica aparente o nominal de combinación de agregados, A: porcentaje del material A, B: porcentaje del material B,  $G_{saA}$ : gravedad específica del material A,  $G_{saB}$ : gravedad específica del material B.

Gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ ): es la relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de agregado, excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua destilada libre de gas, ambos a la misma temperatura establecida su valor es adimensional. Ver figura 7, su cálculo se efectúa mediante la ecuación 6.

$$G_{se} = \frac{\frac{G_{mm}}{100} - \frac{G_b}{CA}}{100 - CA} \quad (6)$$

Dónde:  $G_{se}$ : gravedad específica efectiva de la combinación de agregados,  $G_{mm}$ : gravedad específica efectiva teórica máxima,  $G_b$ : gravedad específica del asfalto, CA: contenido de asfalto

**Figura 7.** Ilustraciones de los volúmenes considerados en la determinación de las gravedades específicas del agregado



Fuente. La autora con base en Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt.<sup>74</sup>

Al realizar este análisis volumétrico de las mezclas compactas es importante tener claros los conceptos que a continuación se describen.

- Porcentaje de volumen de vacíos con aire ( $V_s$ ) o contenido de vacíos con aire: son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran en las partículas del agregado cubiertos con asfalto en una mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen.
- Porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM): volumen del espacio vacío entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica en caliente compactada. Incluyen los vacíos con aire y el volumen de asfalto efectivo y se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen.
- Vacíos llenos de asfalto (VFA): es la fracción de los vacíos en el agregado mineral que contiene ligante asfáltico. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla. Se expresa como porcentaje de los VAM.
- Contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ): contenido total de asfalto en la mezcla, menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado. Se expresa como porcentaje de la masa de la mezcla.

<sup>74</sup> DELGADO-JOJOA, Miguel G., SÁNCHEZ-GILEDE, Jessica A.; RONDÓN-QUINTANA, Hugo A. FERNÁNDEZ-GÓMEZ, Wilmar D.; REYES-LIZCANO, Fredy A. Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. Ingeniería e Investigación 38 (2). 2018. pág. 18–26. Disponible: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2>.

- Gravedad específica máxima ( $G_{mm}$ ): en una mezcla sin compactar es la relación entre la masa de una muestra de mezcla (sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto,  $V_a=0$ ) y la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.
- Gravedad específica bulk de una mezcla asfáltica compactada ( $G_{mb}$ ): es la relación entre la masa de un volumen de mezclas total compactada (teniendo en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto) y la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.
- Volumen de asfalto absorbido ( $V_{ba}$ ): volumen de ligante asfáltico en una mezcla asfáltica en caliente que ha sido absorbido en los poros de las partículas del agregado.  $V_{ba}$  es un volumen de ligante asfáltico en la mezcla que permite calcular el contenido de asfalto efectivo.

Ecuaciones de vacíos:

$$G_{mb} = \frac{(1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{(1 - P_b)}{G_{se}}} \quad (7)$$

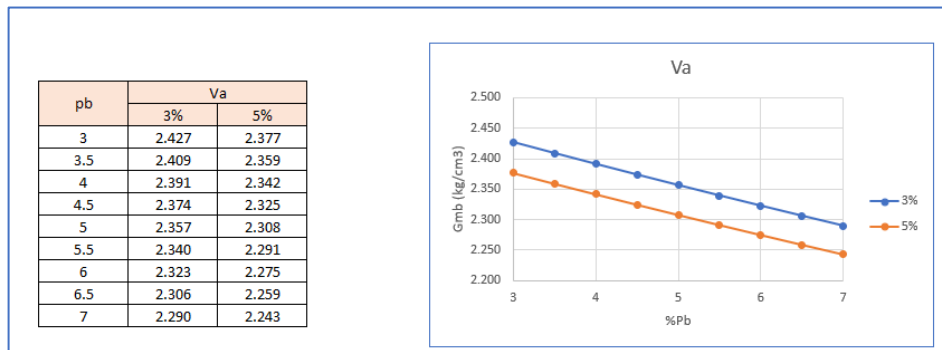
$$G_{mb} = \frac{(1 - VMA)}{(1 - P_b)} G_{sb} \quad (8)$$

$$G_{mb} = \frac{VFA}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{(1 - P_b)}{G_{se}} - (1 - VFA) \frac{(1 - P_b)}{G_{sb}}} \quad (9)$$

**2.6.3 Polígono de vacíos.** En el siguiente ejemplo se muestra la construcción de un polígono de vacíos para una mezcla asfáltica partiendo de los siguientes datos:  $G_{sb} = 2.52$ ,  $G_{se} = 2.62$ ,  $G_b = 1.02$  y las especificaciones de vacíos a cumplir varían dentro de los siguientes rangos:  $V_a = 3 - 5\%$ ,  $VMA = 13 - 15\%$  y  $VFA = 65 - 75\%$  (las especificaciones solo piden un valor mínimo para VMA, por lo cual, para poder cerrar el polígono se incrementa en 2% el valor mínimo).

En la ecuación 7, se varía el valor de contenido de asfalto ( $P_b$ ), se utilizan los valores de los límites de vacíos con aire 3% y 5%) y se calculan los valores de  $G_{mb}$  para cada porcentaje de asfalto. En la figura 8, se muestran y resultados utilizados para graficar las isólicas de los vacíos de aire, para el cálculo de los valores que representan las isólicas de los vacíos del agregado mineral se usa la ecuación 8, y la figura 9 muestra los resultados, para las isólicas que determinan el valor de los vacíos llenos de asfalto se utiliza la ecuación 9 y representación de las isólicas se presenta en la figura 10.

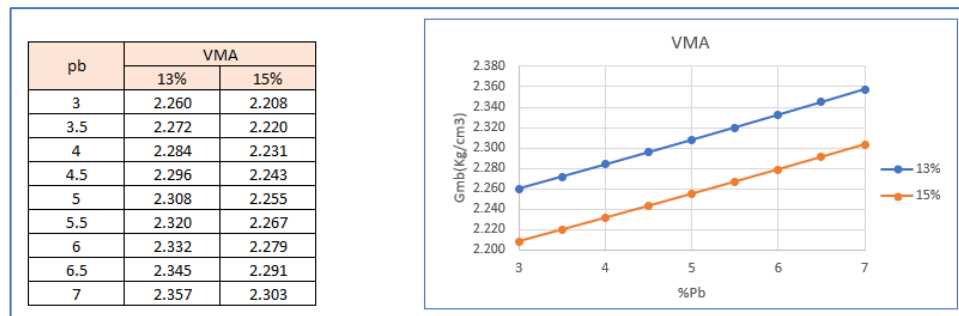
**Figura 8.** Rango de valores de vacíos de aire que determinan las isométricas de  $V_a$  e isólicas de  $V_a$



Fuente. Autora, con base en aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.<sup>75</sup>

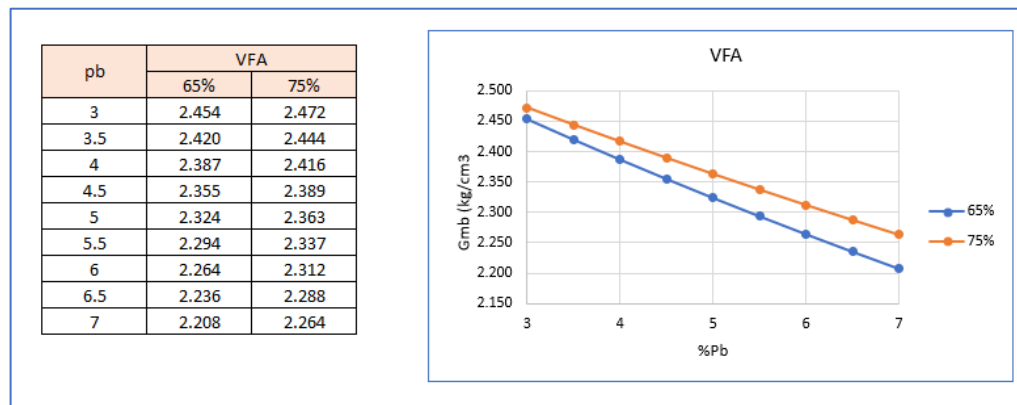
<sup>75</sup> SÁNCHEZ. Op. Cit, pág. 20.

**Figura 9.** Rango de valores de vacíos en el agregado mineral que determinan las isométricas de VMA e isólineas de VMA



Fuente. La autora, con base en aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.<sup>76</sup>

**Figura 10.** Rango de valores de vacíos llenos de asfalto que determinan las isométricas de VFA e isólineas de VFA



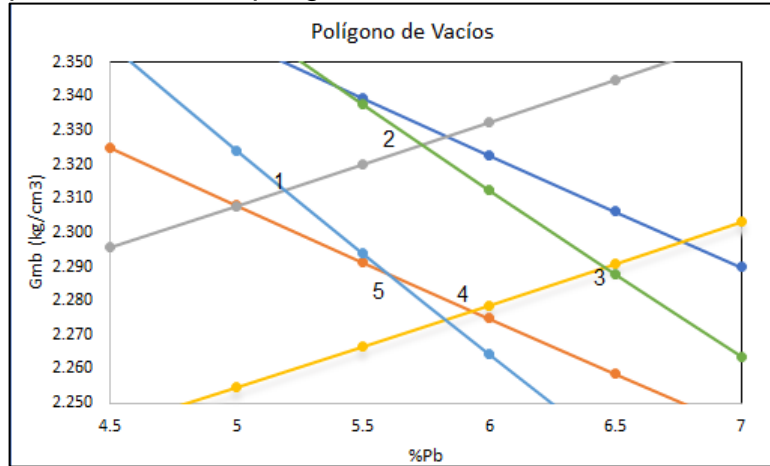
Fuente. La autora, con base en Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.<sup>77</sup>

Finalmente se interponen las isólineas de los vacíos,  $V_a$ , VAM y VFA, para definir así el polígono de vacíos representado en la figura 11.

<sup>76</sup> *Ibidem.*

<sup>77</sup> *Ibidem.*

**Figura 11.** Representación del polígono de vacíos



Fuente. La autora, con base en <sup>v</sup> Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.<sup>78</sup>

Según la metodología Ramcodes, todos los puntos que estén dentro del polígono cumplen con las especificaciones de vacíos, lo ideal es encontrar el contenido óptimo de asfalto, este valor está determinado por el centroide del polígono. El cual se calcula con el promedio de coordenadas de todos los vértices que conforman el polígono. A continuación, se presentan las ecuaciones 10 y 11 para hallar los valores.

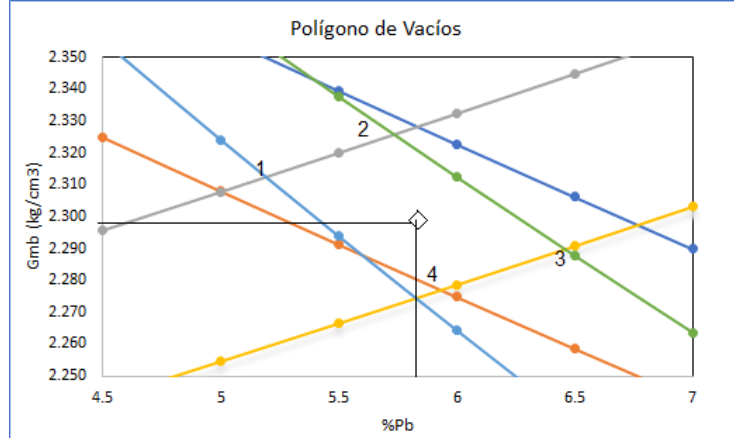
$$(P_b)_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_b)_i}{n} \quad (10)$$

$$(G_{mb})_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{mb})_i}{n} \quad (11)$$

Para el ejemplo el valor de  $(P_b)_{promedio} = 5.77\%$  y el valor de  $(G_b)_{promedio} = 2.298$  se muestra en la figura 12

<sup>78</sup> *Ibidem.*

**Figura 12.** Centroide del polígono de vacíos



Fuente. La autora, con base en Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.<sup>79</sup>

Después haber determinado el contenido de asfalto óptico teórico mediante el polígono de vacíos y con la granulometría seleccionada, se comprueba que la mezcla cumpla los requisitos para los cuales de diseño.<sup>80</sup> Indica en su metodología, seguir la verificación del diseño de la mezcla mediante los siguientes pasos:

- Determinar la gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ), gravedad específica bulk ( $G_{sb}$ ) y la gravedad específica aparente ( $G_{sa}$ ) de la combinación de agregados seleccionada. Según las definiciones teóricas se debe cumplir que  $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ , si no se cumple, se deben revisar los ensayos correspondientes.
- Obtener matemáticamente del polígono de vacíos el contenido óptimo de asfalto, teniendo en cuenta las especificaciones y las gravedades específicas de la combinación de agregados.
- se realizan tres (3) especímenes bajo la energía o método de compactación seleccionada (Marshall o compactador giratorio se Superpave). Medir los especímenes y determinar los vacíos, se determina la estabilidad y el flujo de acuerdo al método de compactación seleccionada y se promedian los resultados de los tres especímenes.
- Se verifica si el contenido óptimo de asfalto y la densidad bulk están en el polígono de vacíos. Si no se cumple esta condición, el intento falló, y se debe seleccionar otra combinación de agregados y empezar el procedimiento nuevamente.

<sup>79</sup> *Ibidem.*

<sup>80</sup> *Ibidem.*



– Se verifica, si el promedio de la estabilidad y flujo de los tres especímenes cumple con las especificaciones de la compactación seleccionada (Marshall o compactador giratorio se Superpave). Si no se cumple, el intento falló, se debe seleccionar otra combinación de agregados y empezar el procedimiento nuevamente.

Nota: cuando la mezcla compactada, cumpla con los vacíos, y se esté verificando la estabilidad y el flujo con los parámetros de la compactación seleccionada, no cumpla, se determina que tan lejos se encuentra del resultado de los parámetros especificados. Con una pequeña variación o ajuste en el contenido óptimo de asfalto (máximo de 0.1 a 0.3% por encima o por debajo del óptimo obtenido inicialmente), se puede hacer que esta combinación de agregados cumpla con los parámetros de compactación. Es necesario fabricar tres especímenes nuevos y comprobar el cumplimiento de lo exigido.<sup>81</sup>

## **2.7 PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Los cuatro principales mecanismos de daño de las mezclas asfálticas en servicio, y que deben tenerse en cuenta en el diseño del pavimento, susceptibilidad a la humedad, resistencia a la deformación plástica o ahuellamiento, el desempeño a la fatiga y tensión indirecta para determinar módulo resiliente.

**2.7.1 Susceptibilidad al daño por humedad.** El daño por humedad en las mezclas asfálticas se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla, causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso al interior de su microestructura <sup>82</sup>. Los daños más frecuentes son: el desprendimiento del cemento asfáltico y agregados, que en las investigaciones lo denominan “stripping”, y el desprendimiento gradual de los agregados y la mezcla de la superficie debido al paso constante de los vehículos, llamado “raveling”.<sup>83</sup>

Los mecanismos de daño por humedad en las mezclas asfálticas se inician con los modos de transporte mediante los cuales el agua alcanza el interior de la estructura del material y culminan con el deterioro de la capa, estos modos pueden ser manifestarse de tres formas: inicialmente el agua líquida se infiltra desde la

---

<sup>81</sup> *Ibíd.*

<sup>82</sup> PLAZA, Sara, y RINCÓN Ginna. Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo. 2014.

<sup>83</sup> CARO-SPINEL, Silvia y ÁLVAREZ-LUGO, Alex Eduardo. Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. Revista Facultad de Ingeniería, No. 58. pág. 2011. 95–104.

superficie del pavimento a través de los vacíos interconectados, luego difusión del agua líquida y/o vapor de agua que atraviesan los componentes de la mezcla y finalmente por ascensión capilar de agua líquida proveniente de la superficie interior de la mezcla.<sup>84</sup> Existen varias metodologías para comprobar la susceptibilidad por la humedad, se encuentran ensayos de pérdida de resistencia por inmersión en agua (TRS), ensayo por desprendimiento por fricción de las normas SCT (MMP.4.04.09), el desprendimiento por fricción de AMAAC (RA-08). El ensayo australiano propuesto por la AMAAC (RA-07), el ensayo de ebullición ASTM y sus variantes.<sup>85</sup>, el ensayo Lottman, AASTHO T 283, que permiten caracterizar los mecanismos de deterioro a nivel microestructural<sup>86</sup>.

En Colombia la norma INV E-725-13 llamado ensayo de resistencia a la tensión indirecta (TRS), su propósito es medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Para realizar esta evaluación se preparan un grupo de especímenes de acuerdo con la fórmula de trabajo sin aditivos, la compactación se hace de tal forma que se obtenga un contenido de vacíos de aire aproximado entre 6-8 %, se divide la cantidad de especímenes en dos subgrupos; uno se mantiene en condiciones secas y el otro se satura parcialmente en agua. El potencial daño por humedad queda indicado por la relación entre las resistencias a la tensión indirecta de los dos subgrupos en condiciones establecidas en el ensayo.

Preparación de los especímenes para el ensayo en laboratorio: se elaboran seis especímenes para cada prueba, los subgrupos quedan conformados de tres unidades, las medidas de los especímenes son: diámetro 102 mm (4") y altura 63.5 mm (2.5"), aunque también se pueden usar especímenes de otras dimensiones.

Procedimiento. Para cada espécimen, se determina la gravedad específica máxima, altura, gravedad específica bulk, se calcula el porcentaje de aire respecto del volumen total (%V<sub>A</sub>) y se expresa el volumen de aire en centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>). Se dividen los especímenes en los dos subgrupos indicados anteriormente y se someten a las condiciones indicadas. Los especímenes saturados parcialmente con una temperatura de 60°C (140°F). Se calcula la resistencia a la tensión (R<sub>T</sub>) utilizando la ecuación 12.

$$R_T = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (12)$$

Donde: R<sub>T</sub>: Resistencia a la tensión, kPa, P: carga máxima, N, t: altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba, mm, D: diámetro del espécimen,

---

<sup>84</sup> *Ibíd.*

<sup>85</sup> VALDÉS, Berenice, and GARNICA, Paul Anguas. 2011. Susceptibilidad a La humedad: de lo básico a lo práctico 1 (1): 12.

<sup>86</sup> CARO, Silvia y ÁLVAREZ, Álex Eduardo. Op. Cit. pág. 95-104.

mm.

Se calcula la relación de resistencias a tensión, y para ello se usa la ecuación 13.

$$RRT = \left[ \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] \times 100 \quad (13)$$

Donde: RRT: Relación de resistencia a la tensión, %,  $R_{TH}$ : Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua,  $R_{TS}$ : Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo mantenido en seco.

**2.7.2 Resistencia a la deformación plástica o ahuellamiento** El ahuellamiento es una falla que se manifiesta superficialmente en los pavimentos asfálticos, como consecuencia de la aplicación reiterada de las cargas del tránsito. Consiste en la acumulación de la deformación vertical permanente que se produce en todas las capas que forman la estructura de la vía evidenciada en correspondencia con la huella de circulación del tránsito, reduciendo la vida en servicio del pavimento y originando importantes riesgos en la circulación de los usuarios. En la tabla 7 se muestran los factores que afectan el fenómeno del ahuellamiento

**Tabla 7.** Factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas

COMPONENTE	FACTOR	CAMBIO EN EL FACTOR	EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO
Agregados pétreos	Textura superficial	Liso o rugoso Redonda o angular Incremento en tamaño máximo	Incrementa
	Forma		Incrementa
	Tamaño		Incrementa
Ligante asfáltico	Rigidez	Incremento	Incrementa
Mezcla	Contenido de ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos	Incremento	Disminuye
	Grado de compactación	Incremento	Incrementa
Condiciones de campo	Temperatura Esfuerzo a deformación Repeticiones de carga Agua	Incremento	Disminuye Disminuye Disminuye Disminuye

Fuente. La autora a partir de Rondón, H referencia a de Sousa et ál., (1991).<sup>87</sup>

<sup>87</sup> RONDÓN, Hugo, cita a de SOUSA y otros (1991). Asfaltos y mezclas asfálticas. editorial ECOE, Santafé de Bogotá. 2013.

Según Tarefder et ál. (2003), citado por Rondón<sup>88</sup>, el ahuellamiento se afecta principalmente por tres factores: mezcla (gradación del agregado, grado de funcionamiento PG del ligante, contenido de asfalto), carga (presión de llanta, tipo de eje) y ambiente (temperatura, humedad, precipitación).

La norma INV E 756-13, permite determinar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. La prueba consiste en someter una probeta prismática de mezcla asfáltica (en la norma los moldes son prismáticos, aunque el procedimiento general del ensayo permite probetas de otras formas siempre y cuando se cumplan los requisitos de tamaño mínimo y fijación), al paso alternativo de una rueda, en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Las probetas, de 30x30x5 cm, se compactan por vibración. El ensayo se realiza a una temperatura constante de 60°C, haciendo pasar una rueda metálica, de 20 cm de diámetro, dotada de una banda de rodadura de caucho macizo de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, que ejerce una presión de contacto sobre la superficie de la probeta de 900 kN/m<sup>2</sup>. La frecuencia del movimiento de vaivén es de 42 pasadas por minuto, con un recorrido en cada sentido de 23 cm. Durante el ensayo, se determinan las deformaciones totales de la probeta en los minutos 1,3 y 5 y a continuación cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

El equipo para el ensayo está compuesto de un conjunto compactador, una base de compactación, un elemento compactador, elementos de extensión y enrase, una máquina de ensayo y la cámara de temperatura controlada. En la foto representada en la figura 13, se observa la máquina del ensayo del laboratorio de la universidad

**Figura 13.** Máquina de ensayo para ahuellamiento



Fuente. La autora, tomada en el laboratorio de pavimentos UPTC.

<sup>88</sup> RONDÓN, Hugo, cita a TAREFDER y otros (2003). Asfaltos y mezclas asfálticas. Editorial académica española. 2013.

El número de probetas para cada ensayo será de 3 por cada variable (contenido de asfalto, temperatura, presión de contacto, etc.), que se desee estudiar.

Masa de las probetas dependerá de los cálculos de los valores correspondiente al volumen del molde y la densidad Marshall de la mezcla, teniendo en cuenta los siguientes criterios: mezclas densas y semidensas, se tomará para la densidad de la probeta el 97%, como mínimo, de la máxima densidad Marshall correspondiente. En mezclas restantes, el cálculo se basará en el 95% de la densidad Marshall máxima correspondiente.

Preparación de los agregados, serán secadas completamente en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , la temperatura de la mezcla y compactación, dependerá de la viscosidad del asfalto en el caso de cementos asfálticos, estas viscosidades serán de  $170 \pm 20$  cSt ( $85 \pm 10$  sSF) en el proceso de mezcla y de  $280 \pm 30$  cSt ( $140 \pm 15$  sSF) en el de compactación.

Preparación de la mezcla, se pesan sucesivamente en un recipiente tarado las cantidades de cada fracción de agregados necesarias para la fabricación de una prueba. La masa total de agregados se calienta a  $30^{\circ}\text{C}$  mayor que la determinada para el mezclado, calentando simultáneamente el asfalto a la temperatura necesaria. Cuando se logran las temperaturas de los dos materiales se vierten en un recipiente la mezcla y se realiza un primer mezclado en seco con fines de homogeneización, se añade rápidamente la cantidad de asfalto hasta obtener el mezclado completo y homogéneo dentro de un tiempo no mayor a dos minutos.

La muestra es colocada en el molde sobre la base de compactación en su anclaje y se monta el collar. Se debe tener en cuenta que la temperatura de la mezcla debe ser mínimo de  $10^{\circ}\text{C}$  superior a la de compactación, se distribuye y se enrasa. Se compacta durante 75 segundos, al cabo del cual se desmonta el collar, se completa la compactación mediante otros tres períodos de 75 segundos cada uno, realizados girando el elemento compactador en el mismo sentido y sucesivamente en  $90^{\circ}$  con respecto a la posición inicial. Una vez finalizada la compactación, se deja enfriar la mezcla a temperatura ambiente durante un periodo entre 12 y 24 horas, antes de someterla al ensayo.

Una vez ensayadas todas las probetas, se calculan los valores medios de todas las deformaciones de la mezcla y se llevan a un gráfico en donde se dibuja la curva de deformación de la mezcla.

A partir de las deformaciones,  $d_i$ , determinadas en el gráfico, correspondientes a los diferentes tiempos "t" del ensayo, se calcula la velocidad de deformación media, correspondiente al intervalo de tiempo  $t_2/t_1$  mediante la ecuación 14.

$$V_{t_2}/V_{t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (14)$$

Dónde:  $V_{t2}/V_{t1}$ : es la velocidad media de deformación para  $t_1$  y  $t_2$ ,  $\mu\text{m}/\text{min}$ ;  $dt_1$  y  $dt_2$ : son deformaciones correspondientes a  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente,  $\mu\text{m}$ ;  $t_1$  y  $t_2$ : son los tiempos que dependen del lapso establecido en las especificaciones.

**2.7.3 Leyes de fatiga.** El fenómeno de la fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio, (Hsu y Tseng, 1996; Martono et ál., 2007; Masad et ál., 2008; Tarefder et ál., 2008), citado por Rondón<sup>89</sup> ocurre en las capas ligadas del pavimento y, para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica producto de cargas impuestas por el parque automotor (cargas repetidas). El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexione, generando esfuerzos de tensión en el extremo inferior de la misma, la repetición de cargas provoca que la capa pierda rigidez y da origen a deformaciones plásticas a tracción lo que conlleva a aparición de microfisuras, que a su vez, debido a la repetición de cargas se producen entrelazados de las microfisuras las cuales llevan a la formación de la grieta, y es ahí donde la vida del pavimento se disminuye porque penetra más fácilmente el agua y el aire.<sup>90</sup>

Dentro de los deterioros de fisuración por fatiga se pueden identificar dos mecanismos. El primero, en que la fisura progresa desde la capa base, se conoce como fisuración ascendente (bottom-up cracking), o también como fisuración “clásica” por fatiga. En este deterioro se produce por tensiones y deformaciones por esfuerzos de tracción en la base de capa bituminosa, y se ve reflejada en la superficie. El segundo mecanismo, las fisuras se inician y se propagan desde la superficie del pavimento hacia la base llamada fisuración por fatiga descendente (top-down cracking). Ocurre en particularmente en pavimentos de mayor espesor, a causa de tensiones combinadas de tracción y corte en la superficie del pavimento bituminoso, en la interfase neumático – pavimento, principalmente con vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado, sumado también al efecto del envejecimiento de la mezcla y el efecto térmico que provoca retracciones en el pavimento cuando las temperaturas descienden. (Muñoz, M., 2013) citado por Rondón.<sup>91</sup>

Las investigaciones para determinar los fenómenos involucrados en la fatiga de mezclas asfálticas en Colombia han sido escasas, probablemente debido a que hasta hace muy pocos años las universidades han destinado algo de su presupuesto para la adquisición de los equipos apropiados para este fin.

En general, los ensayos de mezclas asfálticas consisten en someter una muestra,

---

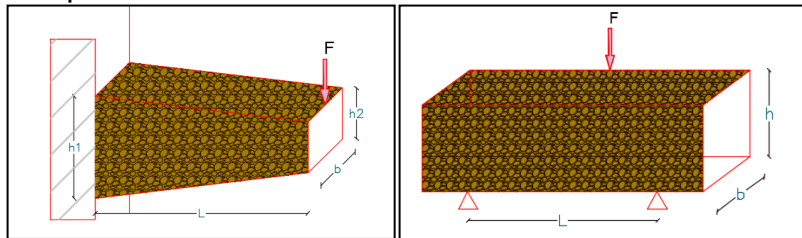
<sup>89</sup> RONDÓN, Hugo, REYES, Alberto. Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño. Ediciones Eco. Bogotá D.C. 2011.

<sup>90</sup> Ibídem.

<sup>91</sup> Ibídem

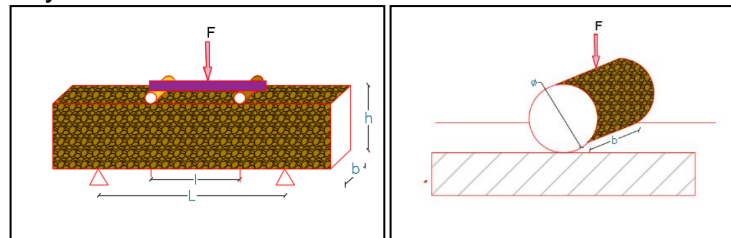
de geometría definida a cargas dinámicas cíclicas, siendo esas cargas muy inferiores a las cargas estáticas que producían la rotura, es decir, el fenómeno de fatiga está asociado al deterioro que produce a consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material, A continuación, se describen los ensayos de flexión simple mediante figuras 14 y 15,

**Figura 14.** Esquema del ensayo de flexión en dos puntos o ensayo de la viga trapezoidal en voladizo. Esquema ensayo a flexión viga cargada en el punto central o ensayo en tres puntos



Fuente. La autora con base en Ensayo Dinámico Axial En Probetas Cilíndricas Entalladas Para Medir El Comportamiento a Fatiga En Mezclas Asfálticas

**Figura 15.** Esquema de ensayo de flexión viga cargada en el cuatro puntos. Esquema de ensayo de tensión indirecta



Fuente. La autora con base en, Ensayo Dinámico Axial En Probetas Cilíndricas Entalladas para Medir el Comportamiento a Fatiga en Mezclas Asfálticas.<sup>92</sup>

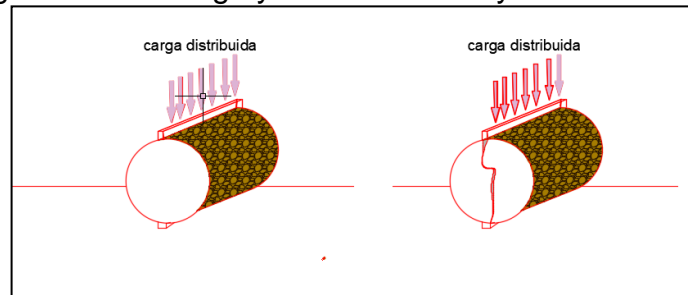
El ensayo diametral fue desarrollado y ha sido usado en los EEUU desde los comienzos de la década de los setenta. La versión inglesa del ensayo de fatiga diametral es conocida como el ensayo de fatiga de tensión indirecta (ITFT, por sus siglas en inglés) y puede realizarse en el NAT (Nottingham Asphalt Tester).<sup>93</sup> citado

<sup>92</sup> MARDONES PARRA, Luis, Gonzalo; VALDÉS VIDAL, Elsa; SÁNCHEZ, Alonso, CALABI FLOODY, Alejandra. ensayo dinámico axial en probetas cilíndricas entalladas para medir el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas. Ingeniería y Desarrollo 37 (1). 2019. pág. 36–56. <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.624.1>.

<sup>93</sup> RONDÓN, Hugo y REYES, Alberto. Op. Cit.

de Khalid<sup>94</sup> En este ensayo, la muestra cilíndrica es cargada repetitivamente con una carga compresiva que actúa en forma vertical y de forma paralela a la sección transversal. En esta configuración de carga los esfuerzos de tensión actúan de forma perpendicular a la carga aplicada. Ver figura No.16

**Figura 16.**Configuración de carga y falla en el ensayo diametral



Fuente. El autor con base en Rondón et al., 2012 referenciado de (Kennedy, 1997)

La figura 17, muestra el equipo perteneciente al laboratorio de la universidad (UPTC) y necesario para la realización del ensayo diametral.

**Figura 17.** NAT (Nottingham Asphalt Tester)



Fuente. La autora

El criterio de fallo tradicional a fatiga define la falla cuando el módulo del material se

---

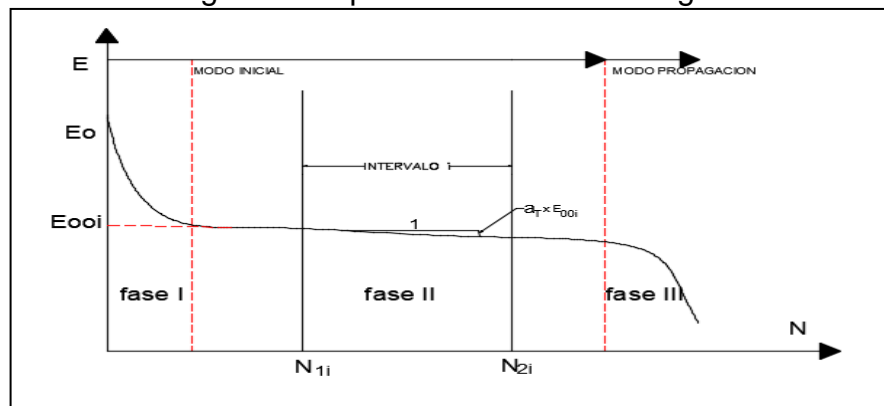
<sup>94</sup> KHALID, H. A. A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous Materials". Materials and Structures, 33(7), 2002. pág. 457-465.



reduce al 50% de su valor inicial. Para los ensayos a esfuerzo controlado, esto ocurre cuando la deformación aumenta al doble, mientras que en los ensayos a deformación controlada ocurre cuando el esfuerzo o carga aplicada disminuye a la mitad de su valor inicial. Este criterio de fallo se cuestiona en la literatura cuando se analizan mezclas más deformables, como, por ejemplo, aquellas con altos contenidos de ligante, o cuando se utilizan ligantes modificados.<sup>95</sup>

Las etapas o fases por las cuales una mezcla se degrada por efecto del proceso de la fatiga fueron descritas por (Baaj, H. et ál., 2005) referenciado por Parra<sup>96</sup> las cuales determinaron tres etapas a saber: fase I, o fase de adaptación, aparecen las primeras microfisuras, produce un descenso rápido del módulo dinámico. Fase II, o fase de fatiga, se presenta un deterioro en la evolución de daño de la mezcla, aparecen las macrofisuras que son el producto de la unión de las microfisuras de la anterior fase, y la fase III, o fase de ruptura, donde las macrofisuras aumentan generando el fallo de la mezcla. Ver figura 18.

**Figura 18.** Fases de degradación por el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas



Fuente. La autora con base en (Baaj & Di Benedetto, 2005) citado por Mardones,<sup>97</sup>

Como ejemplo para visualizar los daños que se genera la fatiga de un pavimento se muestra en la figura 19

<sup>95</sup> PARRA, Paula. Estado del arte de métodos de gestión de residuos de llantas usadas en Colombia, no. May. 2018.

<sup>96</sup> Ibídem.

<sup>97</sup> MARDONES PARRA, Luis, VALDÉS VIDAL, Gonzalo, SÁNCHEZ ALONSO, Elsa, CALABI FLOODY. Alejandra. Ensayo dinámico axial en probetas cilíndricas entalladas para medir el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas. Ingeniería y Desarrollo 37 (1): 36–56. pág. Disponible: <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.624.1>.

**Figura 19.** Fisuración de pavimento por fatiga



Fuente. La autora, tomada como ejemplo en un pavimento en servicio.

En Colombia, para determinar las leyes de fatiga de mezclas asfálticas compactadas en caliente, se someten las briquetas compactadas en laboratorio o tomadas directamente del terreno a flexión dinámica bajo la norma INV- E-784-13, hasta llevarlas a la falla.

**2.7.4 Módulo Resiliente:** Este ensayo consiste en aplicar una carga vertical sobre el espécimen de mezcla asfáltica, al aplicar esta carga, la biqueta ensayada presenta deformaciones horizontales y verticales, la temperatura para estos ensayos son 5°, 20° y 40°C y una frecuencia de 0.33, 0.5 o 1.0 Hz. Para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas se aplican cargas de compresión con ondas de forma de medio seno verso. Esta carga se aplica verticalmente sobre un plano diametral de un espécimen cilíndrico, se miden las deformaciones recuperables horizontal y vertical que resulten y, a partir de ellas, se calculan valores de la relación de Poisson resiliente.

A continuación, se muestran las ecuaciones 15, 16, 17, necesarias para calcular las cargas en módulo resiliente.

– Carga de contacto ( $P_{\text{contacto}}$ ) carga vertical entre la muestra y la banda de carga. Su valor es 4% de la carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) oscila entre 22.5 N (5lb) a 89N (20lb).

○  $P_{\text{contacto}} = 0.04P_{\text{máx}}$  (15)

– Carga cíclica resiliente (carga vertical resiliente), ( $P_{\text{cíclica}}$ )

$P_{\text{cíclica}} = P_{\text{máx}} - P_{\text{contacto}}$  (16)

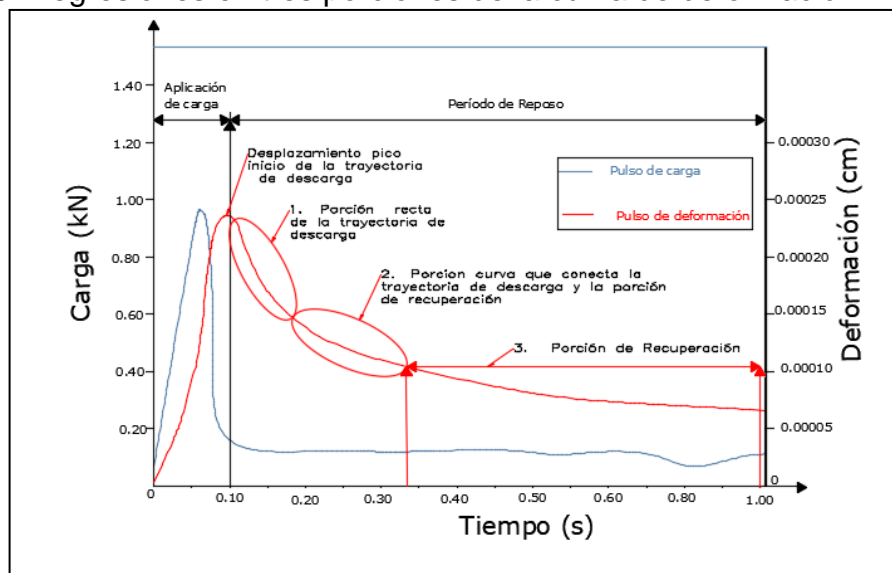
- Carga axial máxima aplicada ( $P_{\text{máx}}$ )

$$P_{\text{máx}} = P_{\text{contacto}} + P_{\text{ciclica}} \quad (17)$$

A partir de la relación de Poisson, se halla el valor del módulo resiliente; se encuentran dos valores: uno, llamado módulo resiliente instantáneo, que resulta de calcular la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga del ciclo; el otro, llamado módulo resiliente total, se calcula a partir de la deformación recuperable dependiente del tiempo, que continúa durante la descarga y el resto del período de reposo del ciclo. {Formatting Citation}

Para la Deformación instantánea, se recomienda realizar regresiones en tres porciones de la cura de deformación. La recta (1), indica la porción recta de la trayectoria de descarga, la recta (2), representa la porción de la curva que une la trayectoria de descarga con la de recuperación, y la recta (3) corresponde a la recuperación. Ver figura 20

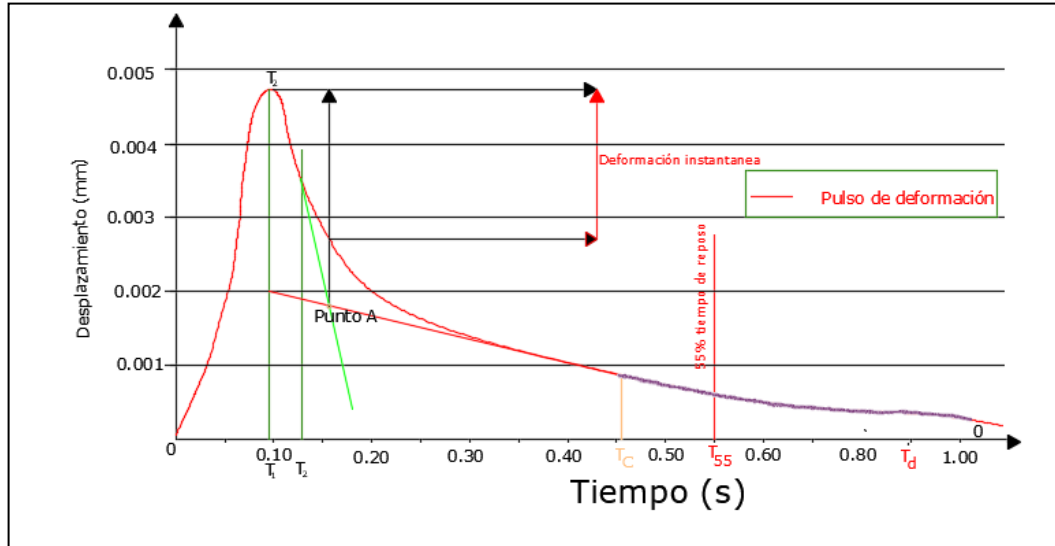
**Figura 20.** Regresiones en tres porciones de la curva de deformación



Fuente. La autora con base a INV –E 749 -13.

En la figura 21, se muestra la regresión en la porción recta correspondiente a la trayectoria de descarga entre  $T_1$  y  $T_2$  relacionados con  $T_m$  (desplazamiento pico),  $T_a$  y  $T_b$ , y la ecuación 18.

**Figura 21.** Determinación de la deformación instantánea



Fuente. La autora con base a INV –E 749 -13.

$$Y = a + bX \quad (18)$$

Donde: Y: valor de deformación; X: tiempo, a, b: constantes de regresión.

– La regresión en la parte curva que conecta la trayectoria recta de descarga con la porción de recuperación, da lugar a una ecuación hiperbólica 19, entre  $T_2$  y  $T_c$  (40% del período de reposo).

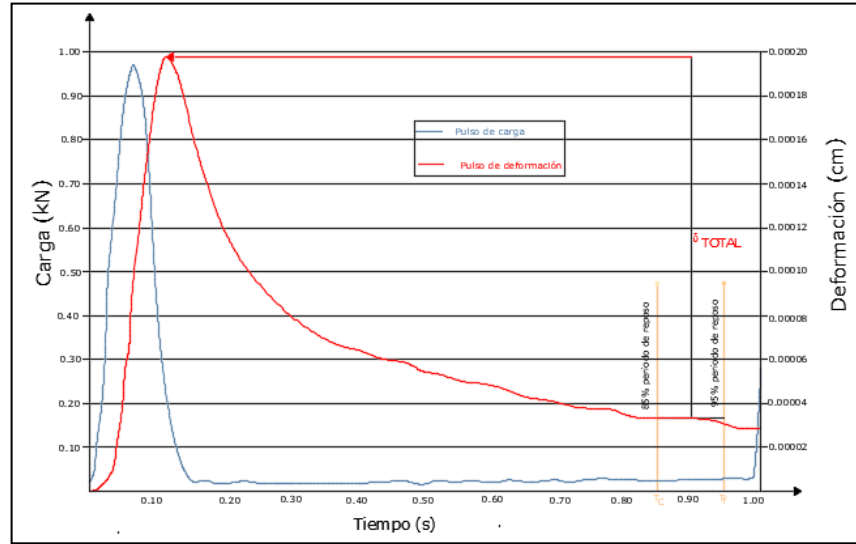
$$\circ Y = a + \frac{b}{X} \quad (19)$$

– Regresión en la porción de recuperación entre 40 y 90% del período de reposo (rango recomendado), que da lugar a una ecuación hiperbólica. La porción de recuperación corresponde al tiempo desde  $[(0.4 \times 0.9s) + 0.1] = 0.46$  s hasta  $[(0.9 \times 0.9s) + 0.1] = 0.91$  s, y está limitada por  $T_c$  y  $T_d$  (INVIAS, 2013). Ver figura. 23

– Se dibuja una tangente a esta hipérbola e el punto correspondiente al 55% del período de reposo (punto recomendado) ( $T_{55}$ ), que corresponde al instante  $[(0.9 \times 0.55) + 0.1] = 0.595$  s. la intersección de esta tangente con la prolongación de la recta de la trayectoria de descarga se usa para determinar el tiempo para la deformación instantánea. Figura. 22

**Deformación total:** se determina de las gráficas deformación – tiempo, restando la deformación obtenida al final de un ciclo de carga – descarga, se usa el promedio de los valores de la deformación correspondientes a los tiempos 85 y 95% del período de reposo a partir de los valores pico de deformación,  $[(0.9 \times 0.85) + 0.1] = 0.865$ s y  $[(0.9 \times 0.95) + 0.1] = 0.955$  s, designados como  $T_e$  y  $T_f$  de la figura 22

**Figura 22.** Determinación de la deformación total



Fuente. La autora con base a INV –E 749 -13.

**Ecuación de Poisson:** de acuerdo a Zhang et ál., (1997), citado por<sup>98</sup> involucran las constantes de la tabla. 8 y mediante la ecuación 20 se determina su valor.

$$\mu = \frac{I4 - I1 \times \left[ \frac{\delta_y}{\delta_h} \right]}{I3 - I2 \times \left[ \frac{\delta_y}{\delta_h} \right]} \quad (20)$$

Donde:  $\mu$ : relación de Poisson;  $\delta_v$ : deformación vertical recuperable (instantánea o total), medida sobre el diámetro vertical del espécimen, mm (pg);  $\delta_h$ : deformación horizontal recuperable (instantánea o total), medida sobre el diámetro horizontal del espécimen, mm (pg);

**Tabla 8.** Constantes para calcular el módulo resiliente y la relación de Poisson

LONGITUD DE MEDICIÓN COMO FRACCIÓN DEL DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN	I1	I2	I3	I4
0.25	0.144357	-0.4508	0.155789	-0.48859
0.5	0.233936	-0.78006	0.307445	-1.069463
0.75	0.265925	-0.952670	0.430875	-1.934486
1.00	0.269895	-1.000000	-0.06275	-3.587913

Fuente. La autora con base a (INV-E-749-13)

<sup>98</sup> *Ibidem.*

El módulo resiliente, se calcula a partir de la relación de Poisson y de la deformación horizontal (instantánea o total) mediante la ecuación 21.

$$M_R = \frac{P_{ciclica}}{\delta_h + t} (I1 - I2 \times \mu) \quad (21)$$

Donde:  $M_R$ : módulo resiliente de elasticidad instantáneo o total, MPa, (lbf/pg<sup>2</sup>),  $\delta_h$ : deformación horizontal recuperable (instantánea o total) (pg),  $\mu$ : relación de Poisson instantánea o total;  $t$ : espesor del espécimen, mm (pg),  $P_{ciclica}$ : carga cíclica aplicada al espécimen, N (lbf),  $P_{m\acute{a}x}$ : carga máxima aplicada, N(lbf),  $P_{contacto}$ : carga de contacto, N(lbf).

### 3. ENSAYOS Y RESULTADOS

En este capítulo se procede a la elaboración y ensayos de experimentación, en él se pretende resolver las incógnitas que generaron la investigación. La hipótesis planteada. se busca definir si la escoria de horno eléctrico EAF cumple con los parámetros establecidos por la normativa del INVIAS. Las etapas mediante las cuales se desarrolló esta investigación fueron: inicialmente se realizó la caracterización de las fuentes y los materiales a utilizar, se aplicó la metodología Ramcodes y se estableció si el comportamiento de la escoria dentro de las dos combinaciones de remplazo por el agregado grueso son las indicadas en las pruebas de desempeño de las mezclas asfálticas en caliente cumpliendo con los parámetros establecidos por las normas invias del año 2013, tales son, susceptibilidad a la humedad, resistencia a la deformación plástica, las leyes de fatiga y módulo resiliente.

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Es importante que las características de los materiales usados para realizar la investigación provengan de fuentes confiables, para este fin, los agregados pétreos fueron obtenidos de la cantera La Roca en el municipio de Moniquirá, la arena fue suministrada por la cantera de arena de la vereda Chorro Blanco del municipio de Tunja, la escoria EAF fue aportada por la Siderúrgica Geardau Diaco – Tuta y el cemento asfáltico se solicitó a la empresa Manufacturas y Procesos Industriales MPI de Barrancabermeja.

**3.1.1 Localización de las fuentes: Agregados Pétreos.** Suministrados por la cantera La Roca, una empresa dedicada a la venta de material triturado para obras civiles. En ella se pueden encontrar materiales para base, subbase, arena de río, arena de peña, base granular, arenilla lavada sucia, gravilla de ½ y ¾ de pulgada, piedra filtro, recebo y demás materiales pétreos. Dicha cantera se encuentra debidamente registrada ante las entidades medioambientales y de comercio del municipio de Moniquirá, en la figura 23 se muestra la localización está en el Km. 6 vía Moniquirá – Tunja.

**Figura 23.** Localización fuente Cantera la Roca



Fuente. La autora, a partir de Google maps.

**Escoria Negra de alto horno EAF.** Suministrada por la empresa Geardau Diaco S.A. Multinacional dedicada a la fabricación de acero a partir de chatarra. La planta de donde se obtuvo la escoria está ubicada en el municipio de Tuta – Boyacá. La localización de la planta se muestra en la figura 24

**Figura 24.** Localización fuente Geardau -Diaco – Tuta.



Fuente. La autora, a partir de Google maps.

**Arena.** Proveniente de las fuentes cercanas a Tunja, en la vereda Chorro Blanco. Localizada en el Km. 2 Vía Tunja- Bogotá. Figura 25

**Figura 25.** Localización fuente Arena- Cantera de arena de peña.



Fuente. La autora



La figura 26, muestra la caracterización visual de los materiales pétreos utilizados en el diseño de las muestras. Se presentan en su orden la grava, la escoria EAF, la arena y el filler.

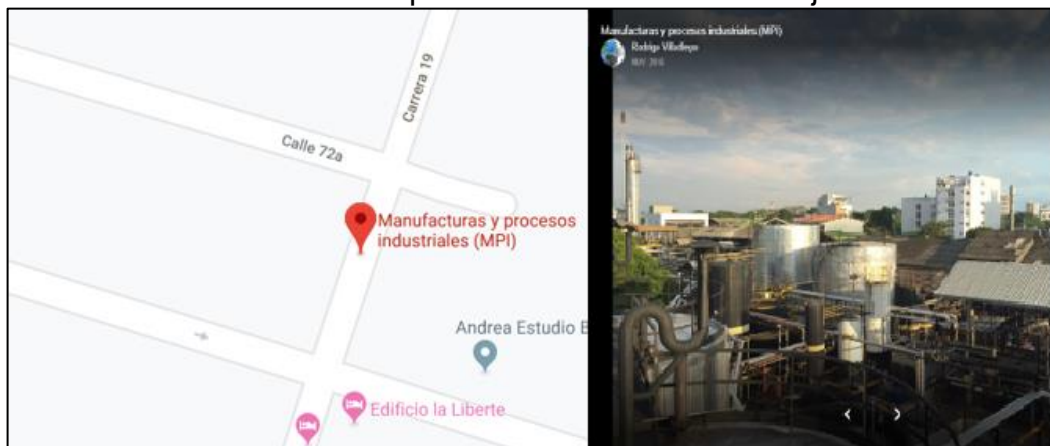
**Figura 26.** Caracterización visual de los agregados pétreos



Fuente. La autora.

**Cemento Asfáltico 60-70.** Suministrado por la empresa Manufacturas y Procesos Industriales MPI de Barrancabermeja, en la figura No. 27, se localiza la empresa MPI

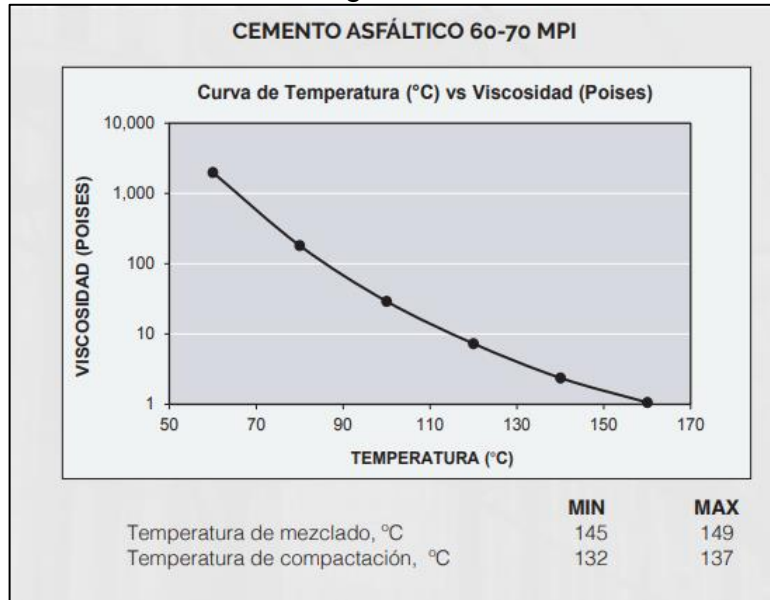
**Figura 27.** Localización de la empresa MPI – Barrancabermeja



Fuente. La autora a partir de Google maps

En la figura 28, se muestra la curva reológica de las especificaciones para el cemento asfáltico 60-70 de la empresa MPI -Barrancabermeja.

**Figura 28.**Ficha técnica -Curva Reológica - CA 60/70 MPI



Fuente. Ficha técnica CA 60/70 MPI

**3.2.2 Resultado de la caracterización de los agregados.** Una vez realizados los ensayos a los materiales pétreos se verifica que cumplan con los valores exigidos en la norma Invias artículo 450 ,2013. En la tabla 9 se muestran los resultados de la caracterización de la grava.

**Tabla 9.** Resultados de la caracterización del agregado pétreo (grava)

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA EL AGREGADO PÉTREO (GRAVA)				
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	E-218	23.41%	25% MÁX	CUMPLE
Degradación por abrasión en el equipo Macro Deval, máximo (%)	E-238	22.17%	30% MÁX	CUMPLE
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	E-224	123 kN	110 kN	CUMPLE
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregado fino y grueso, máximo (%)	E-220	1.74%	18% MÁX	CUMPLE
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	3.20%	10% MÁX	CUMPLE
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227	95.42%	85% MÍN	CUMPLE

Fuente. La autora con base a (INV-450-13)

Los resultados de las densidades del agregado grueso (grava) se presentan en la tabla 10

**Tabla 10.** Resultados de las densidades del agregado pétreo (grava)

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DENSIDADES PARA EL AGREGADO PÉTREO (GRAVA)		
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO
Densidad (Gsb)	E-223	2.693
Densidad relativa (Gsss)		2.735
Gravedad específica (Gsa)		2.697
Absorción del agregado grueso %		1.31

Fuente. La autora con base a (INV-223-13)

Para los resultados de los ensayos de las escorias, se efectuaron tres pruebas por cada parámetro con el fin de tener un valor estimado más eficiente, en la tabla 11 se presentan los ensayos de caracterización y en la tabla 12 los resultados de las densidades de las escorias.

**Tabla 11.** Resultados obtenidos para el agregado siderúrgico (escoria negra). Promedio de los 3 ensayos

ENSAYO	PRUEBA No 1	PRUEBA No 2	PRUEBA No 3	PROMEDIO
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	15.65	16.03	15.9	15.86
Degradación por abrasión en el equipo Macro Deval, máximo (%)	12.33	12.36	12.36	12.35
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	116	115	117	116
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregado fino y grueso, máximo (%)	2.82	2.82	2.83	2.82
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	1.38	1.42	1.4	1.4
Caras fracturadas, mínimo (%)	95.05	94.99	95.02	95.02

Fuente. La autora

**Tabla 12.** Resultados promedio de densidades de agregados siderúrgico EAF de los 3 ensayos y su promedio.

ENSAYO	PRUEBA No 1	PRUEBA No 2	PRUEBA No 3	PROMEDIO
Densidad (Gsb)	3.48	3.47	3.45	3.467
Densidad relativa (Gsss)	3.505	3.5	3.51	3.505
Gravedad específica (Gsa)	3.58	3.6	3.64	3.607
Absorción del agregado grueso %	1.12	1.13	1.1	1.11

Fuente. La autora

Los resultados de la caracterización de la escoria EAF, al igual que el agregado pétreo es comparado con la norma del Invias, para esto se realizó la tabla 13, que nos indica que la escoria presento con respecto al agregado grueso (grava), un mayor valor en el ensayo de pérdida de solidez en sulfato de magnesio, el valor del agregado es 1.74%, y el de la escoria EAF es 2.82%.

**Tabla 13.** Resultados de las densidades del agregado escoria EAF

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA EL AGREGADO ESCORIA EAF				
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	E-218	15.86%	25% MÁX	CUMPLE
Degradación por abrasión en el equipo Macro Deval, máximo (%)	E-238	12.35%	30% MÁX	CUMPLE
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	E-224	116 kN	110 kN	CUMPLE
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregado fino y grueso, máximo (%)	E-220	2.82%	18% MÁX	CUMPLE
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	1.38%	10% MÁX	CUMPLE
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227	95.02%	85% MÍN	CUMPLE

Fuente. La autora con base a (INV-200-13)

Los resultados de las densidades de la escoria se presentan en la tabla 14

**Tabla 14.** Resultados de la caracterización de agregados siderúrgico EAF

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DENSIDADES PARA EL AGREGADO SIDERURGICO (EAF)		
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO
Densidad (Gsb)	E-223	3.467
Densidad relativa (Gsss)		3.505
Gravedad específica (Gsa)		3.607
Absorción del agregado grueso %		1.11

Fuente. La autora con base a (INV-223-13)

Dado que los resultados obtenidos con los ensayos se acondicionan a los parámetros establecidos tanto para los agregados pétreos y para la escoria se hizo la caracterización química de la escoria en el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales de la UPTC (INCITEMA), en la tabla 15 se presentan los resultados obtenidos

**Tabla 15.** Composición química de la escoria (EAF) es la siguiente

Elemento	Fe	Ca	Si	Al	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	S	p
Porcentaje% Composición	38.8	26.7	14	7	6.68	4	1.2	0.58	0.46	0.33	0.2

Fuente. La autora

Los ensayos para la determinación de las características del agregado fino, se compararon con los parámetros establecidos por el Invias, debido a que el equivalente de arena dio como resultado 66.30%, superando el valor mínimo de 50% no es necesario realizar el ensayo de azul de metileno. Además, los agregados finos no presaron plasticidad indicando que no tienen presencia de arcillas. Los resultados se evidencian en la tabla No.16 y 17.

**Tabla 16.** Resultados de la caracterización agregado fino (arena)

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DENSIDADES PARA EL AGREGADO FINO (ARENA)		
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO
Densidad (Gsb)	E-223	2.697
Densidad relativa (Gsss)		2.733
Gravedad específica (Gsa)		2.796
Absorción del agregado grueso %		2.73

Fuente. La autora con base a INV-E223-13.

**Tabla 17.** Resultados de la caracterización agregado fino (arena)

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA EL AGREGADO FINO (ARENA)				
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
Determinación del límite plástico e índice plástico de suelos	E-126	NP	NP	CUMPLE
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregado fino y grueso, máximo (%)	E-220	7.33%	18% MÁX	CUMPLE
Equivalente de arena	E-133	66.30%	50%	CUMPLE
Angularidad de la fracción fina, método A	E-239	46.31%	45% MÁX	CUMPLE

Fuente. La autora con base a INVIAS-2013.

El cemento asfáltico utilizado se caracterizó mediante la norma invias, teniendo en cuenta la temperatura de la ciudad de Tunja y el tránsito NT-3. Como se mencionó anteriormente en las fuentes de materiales, el CA fue suministrado por la empresa Manufacturas MPI de la ciudad de Barrancabermeja. En la tabla 18 se determina el

CA según Invias-13.

**Tabla 18.** Tabla para la determinación AC 60-70 según NT3 y Temperatura de la ciudad de Tunja.

TIPO DE CAPA	NT1			NT2			NT3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN °C								
	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15
Rodadura intermedia	60-70	60-70 U 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100	40-50 60-70 o tipo II (a o b) o tipo III	40-50 60-70 o tipo II (a o b)	60-70 80-100 o tipo II b

Fuente. La autora con base a (INVIAS -E-450- 2013).

Los resultados de la caracterización del cemento asfáltico se presentan en la tabla 19 para la verificación con la normativa.

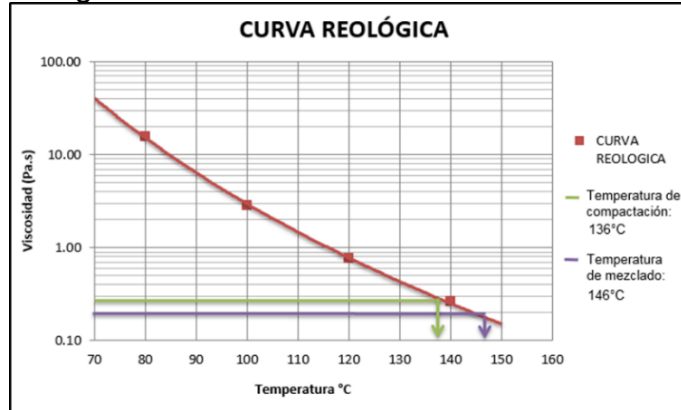
**Tabla 19.** Resultados caracterización cemento asfáltico AC 60 /70

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PARA EL CEMENTO ASFÁLTICO 60-70				
ENSAYO	NORMA INVIAS	RESULTADO OBTENIDO	CRITERIOS DE VERIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
Ductilidad de los materiales asfálticos	INV-E-702	120 cm	100 cm mínimo	CUMPLE
Penetración de los materiales bituminosos	INV-E-706	6.25 mm	6.0 mm mínimo 7.0 mm máximo	CUMPLE
Puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland	INV-E-709	248°C	230°C mínimo	CUMPLE
Punto de ablandamiento o de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)	INV-E-712	49.25°C	48°C mínimo 54°C máximo	CUMPLE
Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional	INV-E-717	157.5 P	150P mínimo	CUMPLE

Fuente. La autora con base a (INVIAS -E-700- 2013).

Con base en los resultados obtenidos del ensayo de viscosidad realizado en el viscosímetro rotacional se grafica la curva reológica del cemento asfáltico con el fin de determinar la temperatura de compactación y de mezclado, como se muestra en la Figura 29

**Figura 29.**Curva reología del CA 60-70



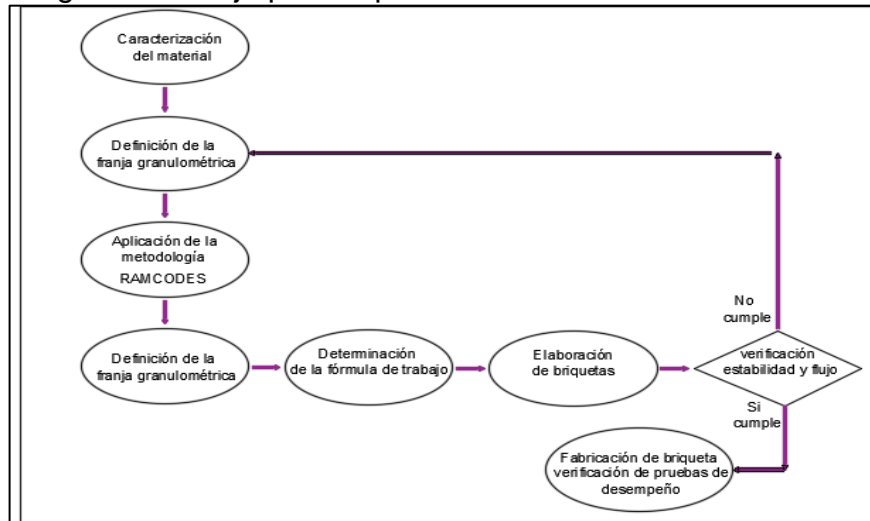
Fuente. La autora con base a (INVIAS -E-700- 2013).

### 3.3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El objetivo del diseño de la mezcla mediante la metodología Ramcodes es conocer el % óptimo de CA, y las densidades de la mezcla, para lo cual se elaboran 3 briquetas a las cuales se les determinan parámetros tales como: % vacíos mediante la determinación del polígono de vacíos, estabilidad y flujo.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que permite seguir un orden para el diseño experimental. En la figura 30.

**Figura 30.**Diagrama de flujo para el proceso de diseño de las mezclas.



Fuente. La autora.

**3.3.1 Diseño experimental.** Para una mezcla en caliente MDC-19 la granulometría determinada por el artículo 450 del Instituto Nacional de Vías<sup>99</sup>, el tamaño máximo del agregado grueso es de 19 mm (3/4"), y para cada una de las tres mezclas de la experimentación, se adoptó la granulometría descrita a continuación en la tabla 20.

**Tabla 20.** Franjas granulométricas para la mezcla densa en caliente MDC-19

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm/U.S.Standard)									
	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2	0.425	0.18	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
DENSEA	%PASA									
	MDC-25	100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19		100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10				100	65-87	43-61	14-25	9-19	5-10
	TOLERANCIA EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)									
	4%					3%			2%	

Fuente. La autora a partir. (INVIAS-E-450, 2013).

**3.3.2 Definición de la franja granulométrica.** Para definir la franja granulométrica de la experimentación, se tomó el valor medio entre el límite superior e inferior de la franja establecida por tabla de especificaciones del INVIAS<sup>100</sup>, la cual se muestra en la tabla 21.

**Tabla 21.** Gradación del agregado para las mezclas base

ABERTURA DEL TAMIZ	ESPECIFICACIÓN MDC-19		% PASA
	Límite inferior	Límite superior	
3 / 4"	100	100	100
1 / 2"	80	95	87.5
3 / 8"	70	88	79
No. 4	49	65	57
No.10	29	45	37
No. 40	14	25	19.5
No. 80	8	17	12.5
No. 200	4	8	6

Fuente. La autora con base (INVIAS-E-450, 2013).

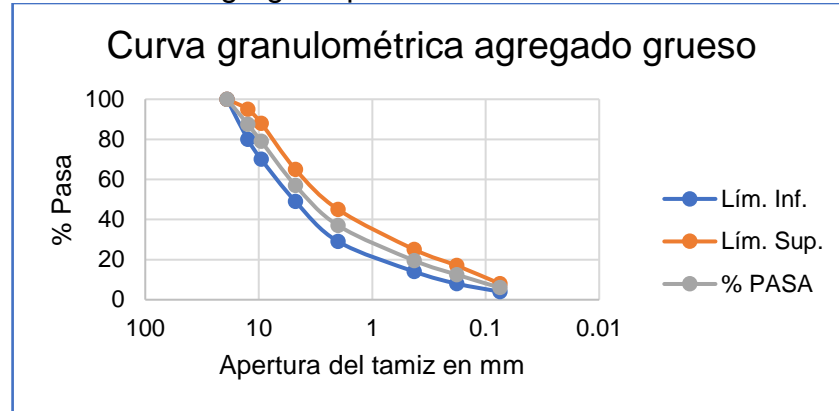
<sup>99</sup> INVIAS. Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2013.

<sup>100</sup> Ibídem.



En la figura 31, se presenta la curva de la gradación para las tres mezclas asfálticas

**Figura 31.** Gradación del agregado para las mezclas base



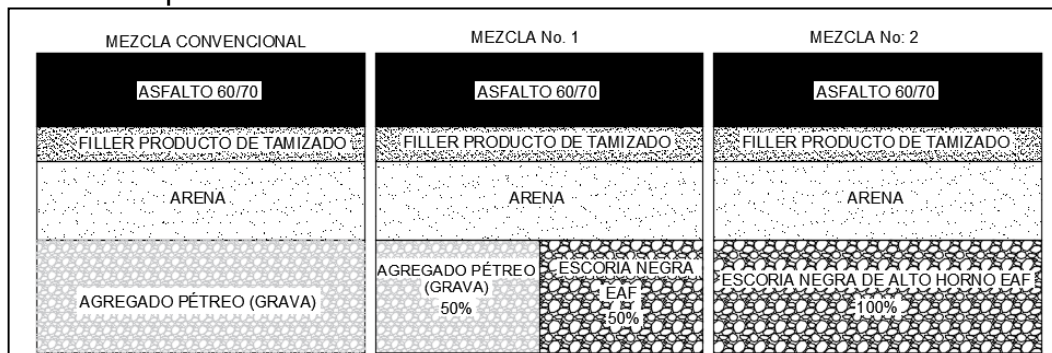
Fuente. La autora con base en (INVIAS, E-450- 2013).

**3.3.3 Combinaciones y especificaciones.** Los tres tipos de mezcla densa en caliente MDC-19 se variaron de la siguiente manera:

- Mezcla convencional: compuesta por agregado pétreo convencional (grava), arena y filler, AC 60/70.
- Mezcla No. 2: compuesta por 50% agregado pétreo, 50% escoria negra de alto horno remplazo de agregado pétreo, arena, filler, AC 60/70.
- Mezcla No. 3. Compuesta por 100% de escoria negra de alto horno como remplazo del agregado pétreo, arena, filler, AC 60/70.

A continuación, se presenta la figura 32, que muestra las combinaciones de las tres mezclas a analizar.

**Figura 32.** Composición de las mezclas



Fuente. La autora.

**3.3.4 Cálculo de los parámetros gravimétricos.** La tabla 22, muestra los resultados de los ensayos de gravedad específica de los agregados.

**Tabla 22.** Resultados de los ensayos de gravedad específica en los materiales

MATERIAL	Gsa	Gsb
Grava	2.697	2.693
EAF	3.607	3.467
Arena	2.796	2.697
Filler	-	2.740

Fuente. La autora con base a INV-E222-13.

**3.3.5 Cálculo de las gravedades específicas.** Para el cálculo de la gravedad específica efectiva de cada mezcla se requiere la gravedad específica teórica máxima, contenido de asfalto y gravedad específica del asfalto, a continuación, en la tabla 23, se muestran los valores obtenidos en los ensayos para cada mezcla.

**Tabla 23.** Datos para el cálculo de gravedad específica efectiva

PARÁMETRO	MEZCLA No. 1	MEZCLA No. 2	MEZCLA No. 3
Gmm, gravedad específica teórica máx.	2.512	2.723	2.891
CA, contenido de asfalto (%)	5.5	4.5	4.5
Gb, gravedad específica del asfalto	1.02	1.02	1.02

Fuente. La autora.

**3.3.6 Verificación Gsa>Gse>Gsb.** La metodología Ramcodes exige que estos parámetros se cumplan la tabla 24 muestra los valores y muestra su verificación.

**Tabla 24.** Resultados y verificación Gsa>Gse>Gsb

Mezcla No.	Gravedades específicas			Verificación
	Gsa	Gse	Gsb	
Mezcla No. 1	2.755	2.745	2.702	Cumple
Mezcla No. 2	3.020	2.955	2.940	Cumple
Mezcla No. 3	3.257	3.165	3.151	Cumple

Fuente. La autora.

### 3.4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA RAMCODES

**3.4.1 Determinación del polígono de vacíos y obtención del contenido óptimo de asfalto.** El polígono de vacíos se encuentra en el cuadrante entre la densidad bulk (eje ordenadas), y el porcentaje de asfalto (eje abscisas). Allí se determina un área la cual está delimitada por las isolíneas de vacíos que obtienen a partir de las gravedades de la combinación de los agregados; gravedad específica bulk (Gsb) y la gravedad específica (Gse), además, el peso específico del asfalto y el peso específico del agua. El polígono de vacíos es un área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos, estos vacíos afectan directamente el comportamiento de la mezcla como ejemplo se ha establecido que si existe altos vacíos de aire (Va) se altera el envejecimiento y la oxidación del ligante, por otra parte, la adherencia de los agregados depende en gran medida de los vacíos llenos de asfalto (VFA) y finalmente el comportamiento de la mezcla al ahuellamiento está afectado por los vacíos en el agregado mineral (VAM)<sup>101</sup>. A continuación, en la tabla 25, se especifican los criterios de control de vacíos para mezclas asfálticas a nivel de NT-3, según Invias -2013

**Tabla 25.** Criterios para el control de vacíos en mezclas asfálticas con NT3

PARÁMETRO	ESPECIFICACIONES INVIAS (NT3 CAPA DE RODADURA
% Vacíos con aire en la mezcla (%Va)	4 a 6
% Vacíos en los agregados minerales (%VAM)	≥15
% Vacíos llenos de asfalto (%VFA)	65 a 75

Fuente. La autora.

**3.4.2 Polígono de vacíos M1.** (Convencional), en la tabla 26 se dan los valores que presentó la mezcla convencional para las gravedades de la combinación de los agregados y el peso específico del asfalto para la mezcla 1.

**Tabla 26.** Datos para determinar el polígono de vacíos de la Mezcla 1.

PARÁMETRO	VALOR
Gravedad específica de los agregados, Gse (g/cm <sup>3</sup> )	2.745
Gravedad específica bulk, Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	2.702
Peso específico del asfalto, (g/cm <sup>3</sup> )	1.02
Peso específico del agua, (g/cm <sup>3</sup> )	1.00

Fuente. La autora.

<sup>101</sup> SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. 2009. "Aplicación del Método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño." RAMCODES de Venezuela, C.A. 1: 20.

Con estos datos y aplicando las fórmulas vistas anteriormente en el ejemplo de la metodología Ramcodes, se determinan los valores de Gmb correspondientes al rango Va (4% a 6%) variando el contenido de asfalto y determinar las isolíneas del parámetro vacíos de aire en la mezcla 1, los valores se evidencian en la tabla 27

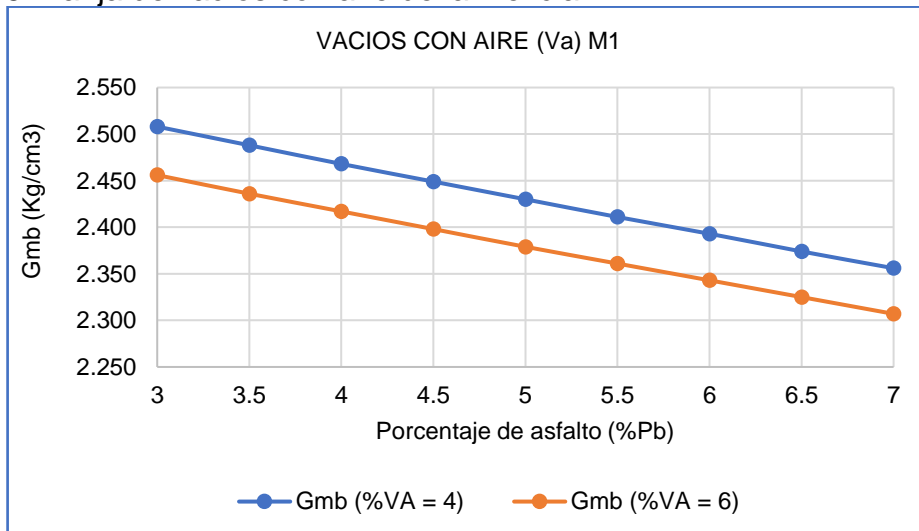
**Tabla 27.** Valores para la franja de vacíos con aire (Va), mezcla 1.

VACÍOS CON AIRE (Va)		
%Pb	Gmb (%VA = 4)	Gmb (%VA = 6)
3	2.508	2.456
3.5	2.488	2.436
4	2.468	2.417
4.5	2.449	2.398
5	2.430	2.379
5.5	2.411	2.361
6	2.393	2.343
6.5	2.374	2.325
7	2.356	2.307

Fuente. La autora.

La figura 33 representa los vacíos con aire de la mezcla 1, con la gravedad específica bulk para Gmb (%VA =4) y Gmb (%VA =6)

**Figura 33** Franja de vacíos con aire de la Mezcla 1.



Fuente. La autora.

Porcentajes del contenido de asfalto y los valores calculados de Gmb, para determinar la gráfica de vacíos en el agregado mineral entre el rango VAM = 15% y

VAM = 17% variando el contenido de asfalto en un porcentaje entre 3% a 7%. se presentan en la tabla 28.

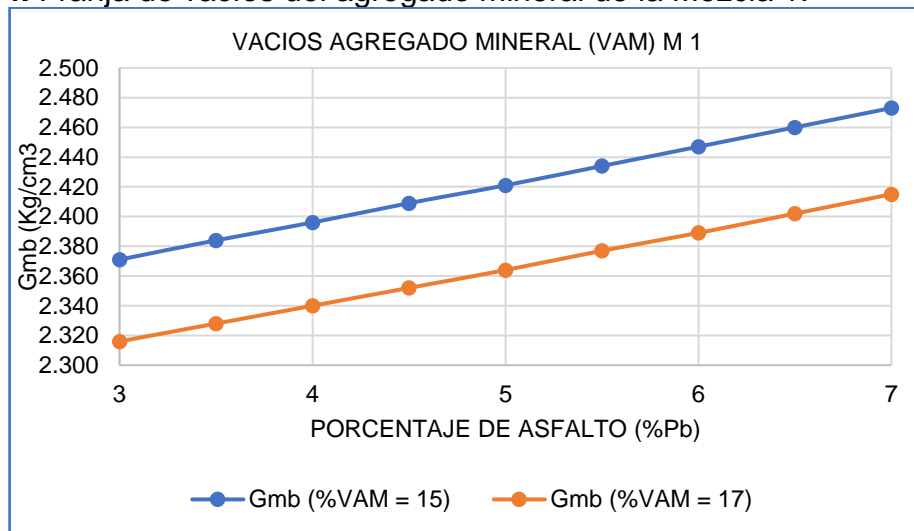
**Tabla 28.** Valores para la franja de vacíos del agregado mineral, mezcla 1.

VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (VAM)		
%Pb	Gmb (%VAM = 15)	Gmb (%VAM = 17)
3	2.371	2.316
3.5	2.384	2.328
4	2.396	2.340
4.5	2.409	2.352
5	2.421	2.364
5.5	2.434	2.377
6	2.447	2.389
6.5	2.460	2.402
7	2.473	2.415

Fuente. La autora.

La figura 34 representa los vacíos del agregado mineral de la mezcla 1, con la gravedad específica bulk para Gmb (%VAM =15) y Gmb (%VAM =17)

**Figura 34.** Franja de vacíos del agregado mineral de la Mezcla 1.



Fuente. La autora.

Porcentajes del contenido de asfalto y los valores calculados de Gmb para la graficar la franja de vacíos llenos de asfalto VFA = 65% y VFA = 75% de la mezcla 1 se muestran en la tabla 29.

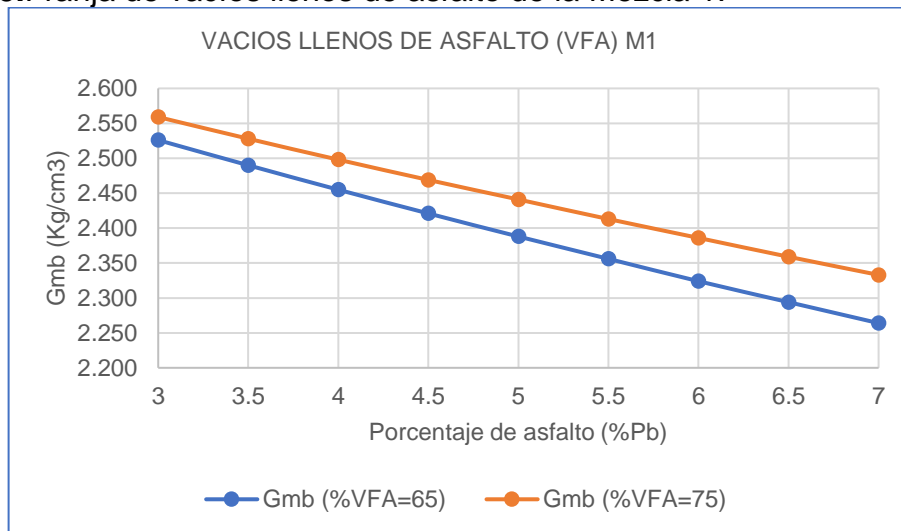
**Tabla 29.** Valores para la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA), mezcla 1.

VACÍOS LLENOS DE ASFALTO (VAF)		
%Pb	Gmb (%VFA = 65)	Gmb (%VFA = 75)
3	2.526	2.559
3.5	2.490	2.528
4	2.455	2.498
4.5	2.421	2.469
5	2.388	2.441
5.5	2.356	2.413
6	2.324	2.386
6.5	2.294	2.359
7	2.264	2.333

Fuente. La autora.

La figura 35, representa los vacíos llenos de asfalto de la mezcla 1, con la gravedad específica bulk para Gmb (%VAF =65) y Gmb (%VAF =75)

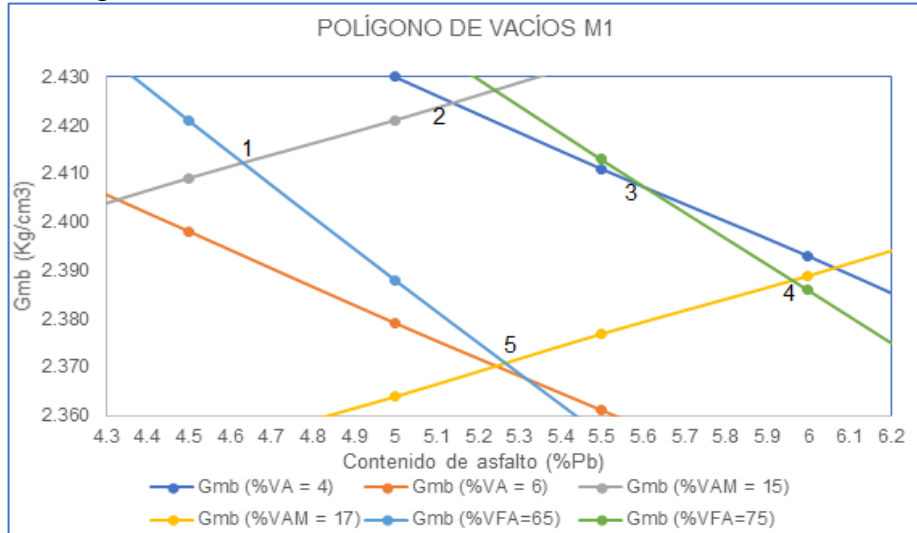
**Figura 35.** Franja de vacíos llenos de asfalto de la Mezcla 1.



Fuente. La autora.

Por último, se superponen los pares de isolíneas de vacíos: Va, VAM y VAF con los valores obtenidos de Gmb, definiendo el área que conforma el polígono de vacíos. Y se representa en la figura 36.

**Figura 36.** Polígono de vacíos de la Mezcla 1.



Fuente. La autora.

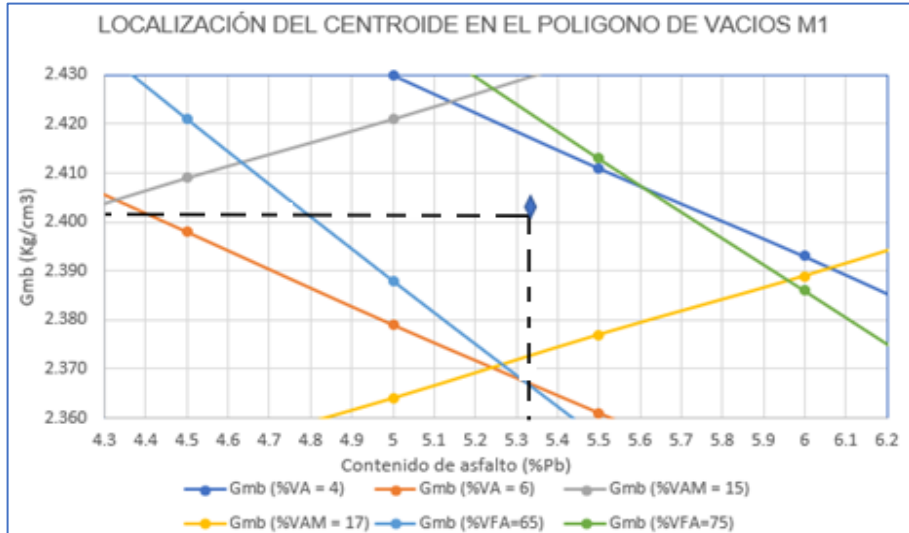
Si siguiendo con los pasos de la metodología Ramcodes, se podría decir que cualquier punto que se encuentre dentro del polígono de vacíos cumple con las especificaciones de vacíos, sin embargo, la metodología establece que el contenido óptimo de asfalto se encuentra al determinar los puntos del centroide del polígono de vacíos, para ello se cuenta con las ecuaciones de promedio de valores mencionadas en el ejemplo, los resultados se muestran en la tabla 30 y en la figura 37.

**Tabla 30.** Cálculo del centroide para el polígono de vacíos de la mezcla 1.

PROMEDIO DE VALORES PARA CENTROIDE DE POLÍGONO DE VACIOS		
PUNTO	Gmb (%)	%Pb
1	2.434	5.13
2	2.406	5.61
3	2.385	5.95
4	2.371	5.28
5	2.412	4.62
<b>PROMEDIO</b>	<b>2.402</b>	<b>5.318</b>

Fuente. La autora

**Figura 37.** Localización del centroide muestra 1



Fuente. La autora.

Para continuar con la metodología Ramcodes, por cada mezcla se debe hacer el mismo procedimiento para determinar el porcentaje óptimo de asfalto. Por tanto, se continúa con las siguientes dos mezclas.

**3.4.3 Polígono de vacíos M-2.** (50% material pétreo como agregado grueso y 50% EAF), en la tabla 31 se dan los valores para las gravedades de la combinación de los agregados y el peso específico del asfalto para la mezcla 2.

**Tabla 31.** Datos para determinar el polígono de vacíos de la Mezcla 2.

PARÁMETRO	VALOR
Gravedad específica de los agregados, Gse (g/cm <sup>3</sup> )	2.955
Gravedad específica bulk, Gsb (g/cm <sup>3</sup> )	2.940
Peso específico del asfalto, (g/cm <sup>3</sup> )	1.02
Peso específico del agua, (g/cm <sup>3</sup> )	1.00

Fuente. La autora.

En la tabla 32 se presentan los datos de vacíos de aire para la mezcla 2



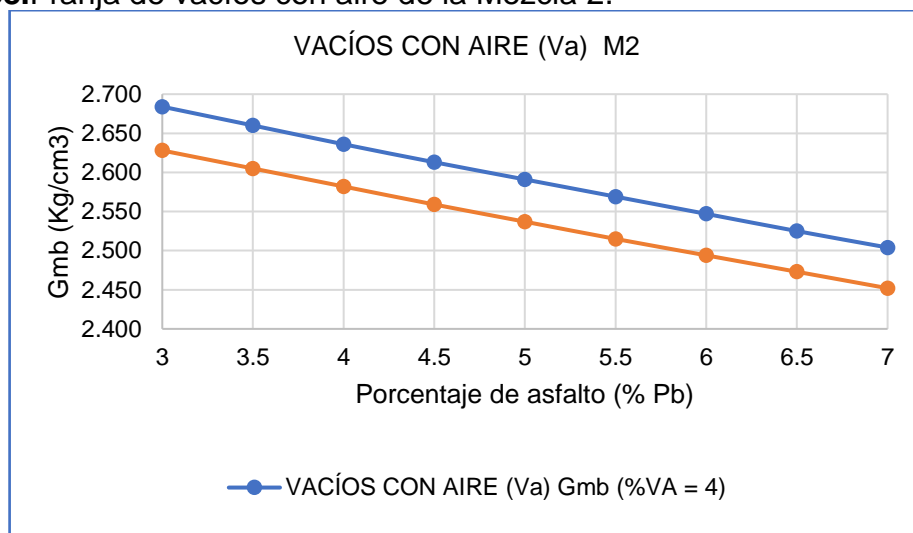
**Tabla 32.**Valores para la franja de vacíos con aire (Va), mezcla 2.

VACÍOS CON AIRE (Va)		
%Pb	Gmb (%VA = 4)	Gmb (%VA = 6)
3	2.684	2.628
3.5	2.660	2.605
4	2.636	2.582
4.5	2.613	2.559
5	2.591	2.537
5.5	2.569	2.515
6	2.547	2.494
6.5	2.525	2.473
7	2.504	2.452

Fuente. La autora.

La figura 38, representa los vacíos con aire de la mezcla 2 con la gravedad específica bulk para Gmb (%VA =4) y Gmb (%VA =6)

**Figura 38.**Franja de vacíos con aire de la Mezcla 2.



Fuente. La autora.

Porcentajes del contenido de asfalto y los valores calculados de Gmb para la graficar la franja de vacíos en el agregado mineral se presentan en la tabla 33, para la mezcla 2.

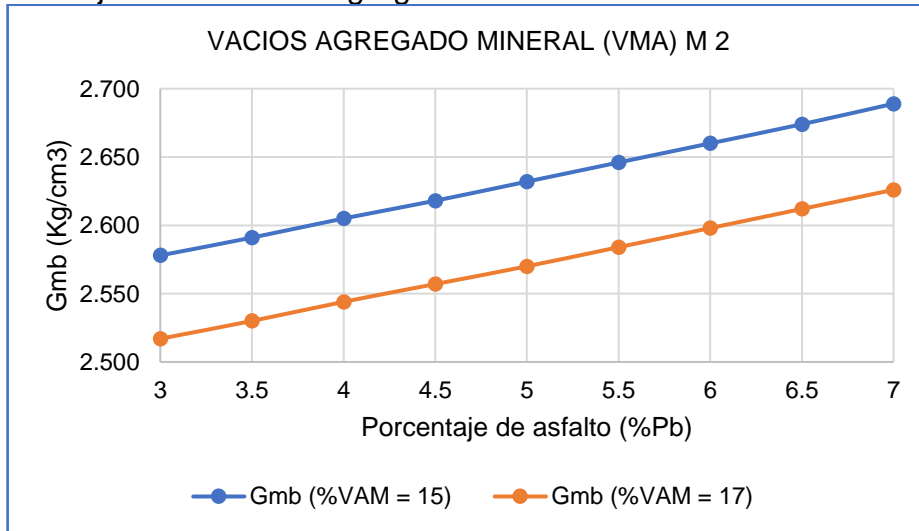
**Tabla 33.** Valores para la franja de vacíos del agregado mineral, mezcla 2

VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (VAM)		
%Pb	Gmb (%VAM = 15)	Gmb (%VAM = 17)
3	2.578	2.517
3.5	2.591	2.530
4	2.605	2.544
4.5	2.618	2.557
5	2.632	2.570
5.5	2.646	2.584
6	2.660	2.598
6.5	2.674	2.612
7	2.689	2.626

Fuente. La autora.

En la figura 39, se representa la franja de los vacíos del agregado mineral de la mezcla 2, con la gravedad específica bulk para Gmb (%VAM =15) y Gmb (%VAM =17)

**Figura 39.** Franja de vacíos del agregado mineral de la Mezcla 2.



Fuente. La autora.

Porcentajes del contenido de asfalto y los valores calculados de Gmb para la graficar la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA) en la mezcla 2. ver tabla 34.

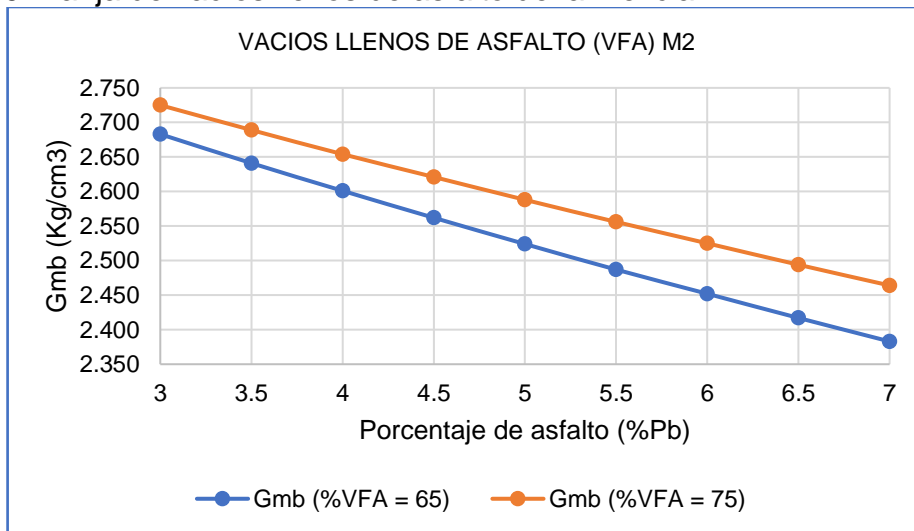
**Tabla 34.** Valores para la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA), mezcla 2.

VACÍOS LLENOS DE ASFALTO (VAF)		
%Pb	Gmb (%VFA = 65)	Gmb (%VFA = 75)
3	2.683	2.725
3.5	2.641	2.689
4	2.601	2.654
4.5	2.562	2.621
5	2.524	2.588
5.5	2.487	2.556
6	2.452	2.525
6.5	2.417	2.494
7	2.383	2.464

Fuente. La autora.

La figura 40, representa la franja de los vacíos llenos de asfalto de la mezcla 2, con la gravedad específica bulk para Gmb (%VAF =65) y Gmb (%VAF =75)

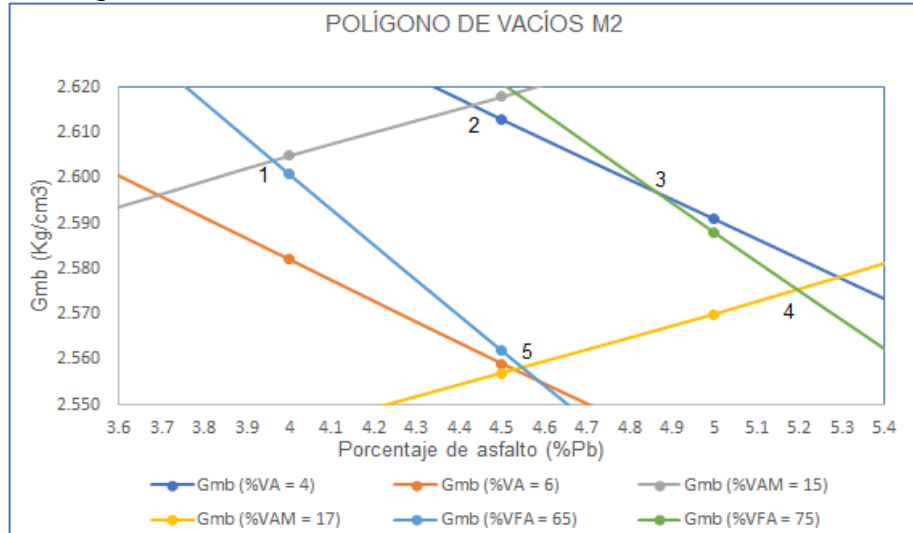
**Figura 40.** Franja de vacíos llenos de asfalto de la Mezcla 2.



Fuente. La autora.

Ahora, se superponen los pares de isolíneas de vacíos: Va, VAM y VAF con los valores obtenidos de Gmb, definiendo el área que conforma el polígono de vacíos. Y se representa en la figura 41.

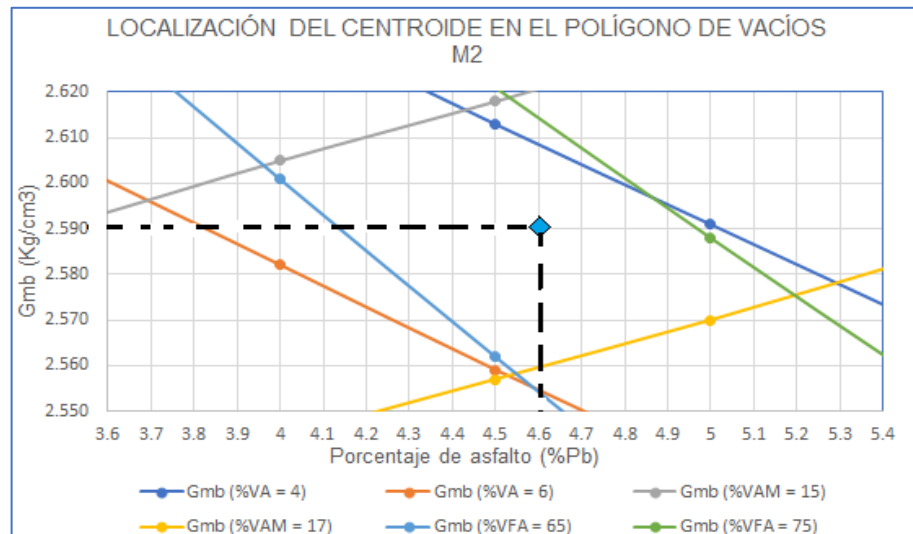
**Figura 41. Polígono de vacíos de la Mezcla. 2**



Fuente. La autora.

En la figura 42, se localizó el centroide del polígono de vacíos para la muestra 2.

**Figura 42. Localización del centroide muestra 2**



Fuente. La autora

Nuevamente mediante los pasos de la metodología Ramcodes se determinan los puntos del centroide para el polígono de vacíos con las ecuaciones de promedio de valores mencionadas en el ejemplo, los resultados se muestran en la tabla 35

**Tabla 35.** Cálculo del centroide para el polígono de vacíos de la mezcla. 2

PROMEDIO DE VALORES PARA CENTROIDE DE POLÍGONO DE VACIOS		
PUNTO	Gmb (%)	%Pb
1	2.617	4.43
2	2.597	4.85
3	2.575	5.19
4	2.558	4.55
5	2.604	3.96
<b>PROMEDIO</b>	<b>2.590</b>	<b>4.60</b>

Fuente. La autora

**3.4.3 Polígono de vacíos M-3.** (100% EAF), en la tabla 36 se dan los valores que presentó la mezcla convencional para las gravedades de la combinación de los agregados y el peso específico del asfalto para la mezcla 3.

**Tabla 36.** Datos para determinar el polígono de vacíos de la Mezcla 3.

PARÁMETRO	VALOR
Gravedad específica de los agregados, Gse (g/cm3)	3.165
Gravedad específica bulk, Gsb (g/cm3)	3.151
Peso específico del asfalto, (g/cm3)	1.02
Peso específico del agua, (g/cm3)	1.00

Fuente. La autora.

En la tabla 37 se presentan los datos de vacíos de aire para la mezcla 3

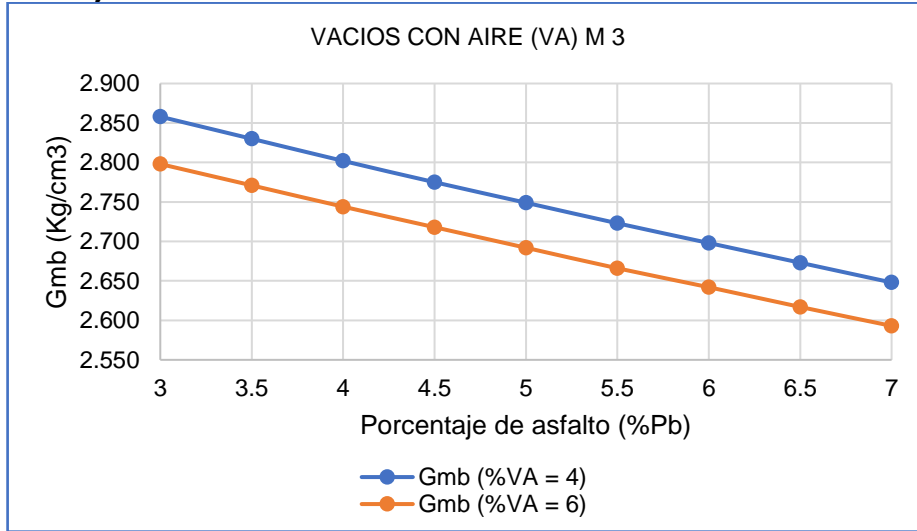
**Tabla 37.** Valores para la franja de vacíos con aire (Va), mezcla 3

VACIOS CON AIRE (Va)		
%Pb	Gmb (%VA = 4)	Gmb (%VA = 6)
3	2.858	2.798
3.5	2.830	2.771
4	2.802	2.744
4.5	2.775	2.718
5	2.749	2.692
5.5	2.723	2.666
6	2.698	2.642
6.5	2.673	2.617
7	2.648	2.593

Fuente. La autora.

La figura 43, representa la franja de los vacíos con aire de la mezcla 3 con la gravedad específica bulk para Gmb (%VA =4) y Gmb (%VA =6)

**Figura 43.** Franja de vacíos con aire de la Mezcla 3.



Fuente. La autora.

Porcentajes del contenido de asfalto y los valores calculados de Gmb para la graficar la franja de vacíos en el agregado mineral se presentan en la tabla 38, para la mezcla 3.

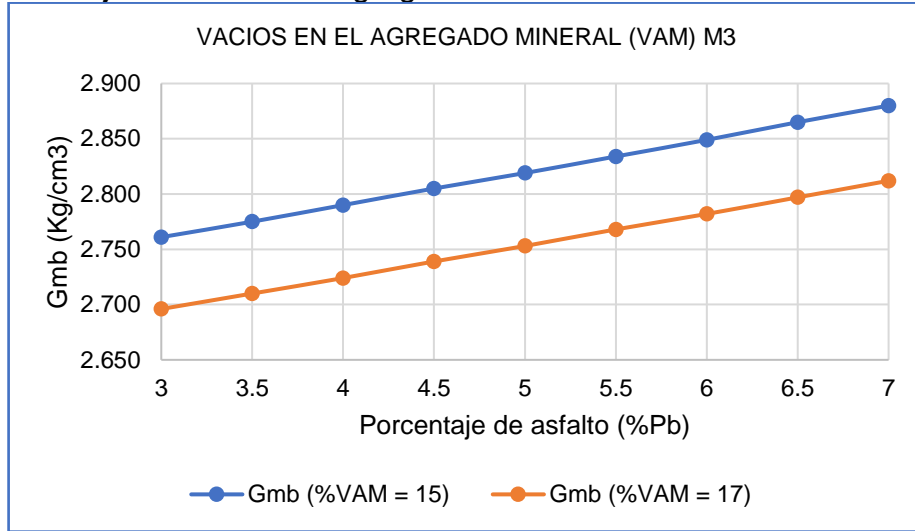
**Tabla 38.** Valores para la franja de vacíos del agregado mineral, mezcla 3

VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (VAM)		
%Pb	Gmb (%VAM = 15)	Gmb (%VAM = 17)
3	2.761	2.696
3.5	2.775	2.710
4	2.790	2.724
4.5	2.805	2.739
5	2.819	2.753
5.5	2.834	2.768
6	2.849	2.782
6.5	2.865	2.797
7	2.880	2.812

Fuente. La autora.

En la figura 44, se representa la franja de los vacíos del agregado mineral de la mezcla 3, con la gravedad específica bulk para Gmb (%VAM =15) y Gmb (%VAM =17)

**Figura 44.** Franja de vacíos del agregado mineral de la Mezcla 3.



Fuente. La autora.

Porcentajes del contenido de asfalto y los valores calculados de Gmb para la graficar la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA) en la mezcla 3 ver tabla 39.

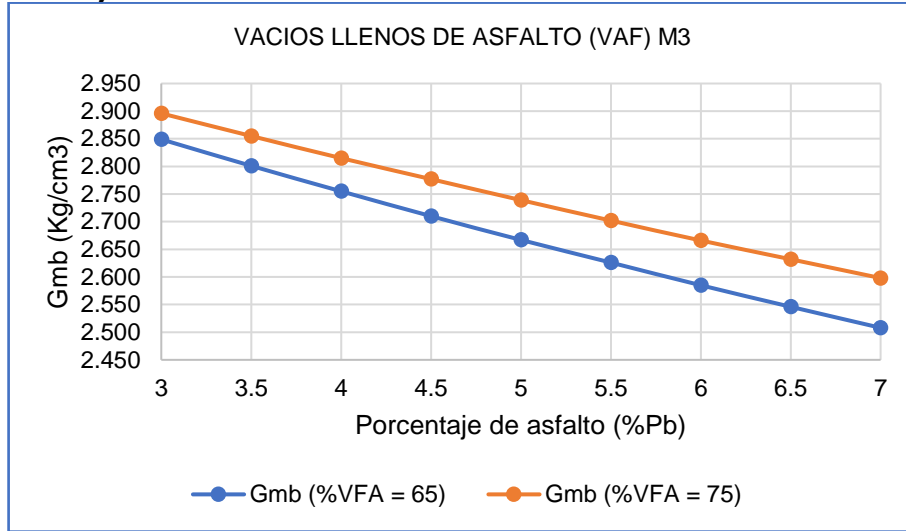
**Tabla 39.** Valores para la franja de vacíos llenos de asfalto (VFA), mezcla 3.

VACIOS LLENOS DE ASFALTO (VAF)		
%Pb	Gmb (%VFA = 65)	Gmb (%VFA = 75)
3	2.849	2.896
3.5	2.801	2.855
4	2.755	2.815
4.5	2.710	2.777
5	2.667	2.739
5.5	2.626	2.702
6	2.585	2.666
6.5	2.546	2.632
7	2.508	2.598

Fuente. La autora.

La figura 45, representa la franja de los vacíos llenos de asfalto de la mezcla 3, con la gravedad especifica bulk para Gmb (%VAF =65) y Gmb (%VAF =75)

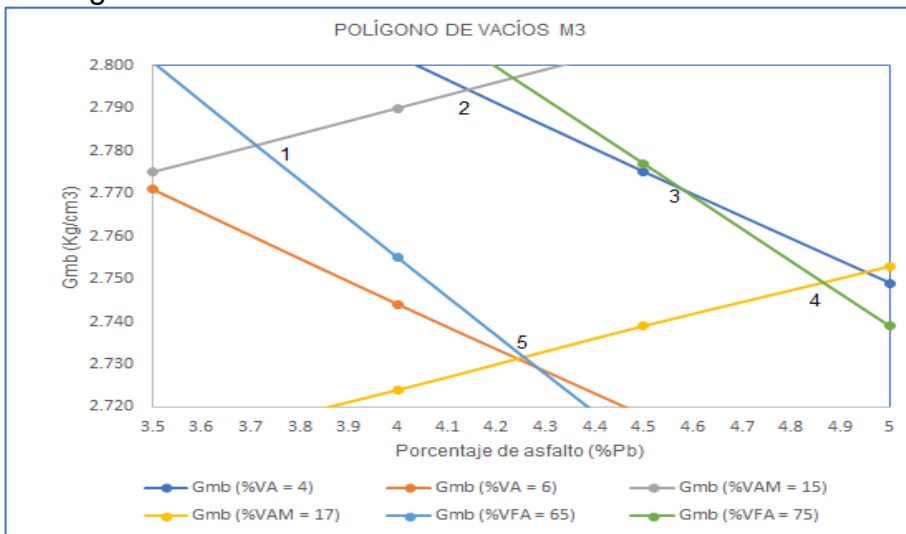
**Figura 45.** Franja de vacíos llenos de asfalto de la Mezcla 3.



Fuente. La autora.

Ahora, se superponen los pares de isolíneas de vacíos: VA, VAM y VAF con los valores obtenidos de Gmb, definiendo el área que conforma el polígono de vacíos. Y se representa en la figura 46

**Figura 46.** Polígono de vacíos de la Mezcla 3.

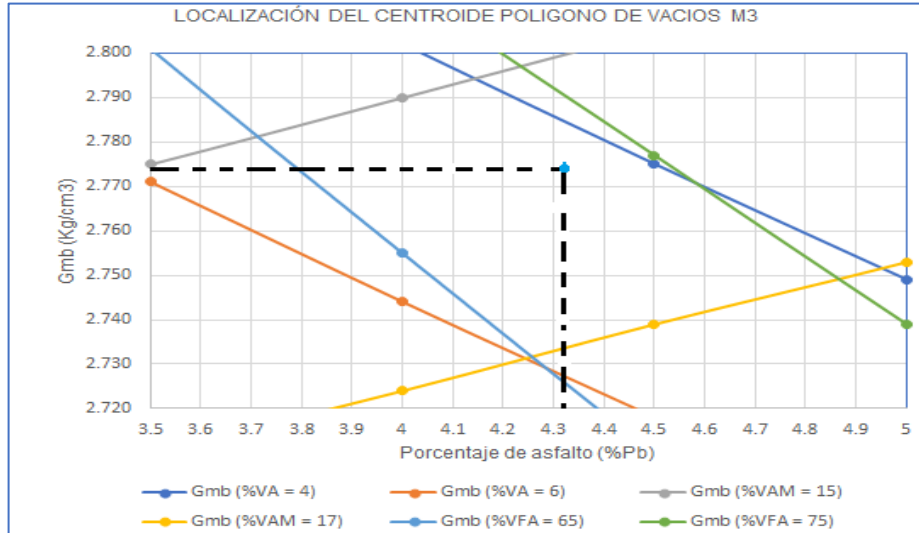


Fuente. La autora.

En la figura 47, se localizó el centroide del polígono de vacíos para la muestra 3.



**Figura 47. Localización del centroide muestra 3**



Fuente. La autora.

Nuevamente mediante los pasos de la metodología Ramcodes se determinan los puntos del centroide para el polígono de vacíos con las ecuaciones de promedio de valores mencionadas en el ejemplo, los resultados se muestran en la tabla 40

**Tabla 40. Cálculo del centroide para el polígono de vacíos de la mezcla 3.**

PROMEDIO DE VALORES PARA CENTROIDE DE POLÍGONO DE VACIOS		
PUNTO	Gmb (%)	%Pb
1	2.794	4.15
2	2.774	4.55
3	2.749	4.86
4	2.733	4.26
5	2.782	3.71
<b>PROMEDIO</b>	<b>2.766</b>	<b>4.31</b>

Fuente. La autora

**3.4.4 Ensayo de estabilidad y flujo.** Para llevar a cabo el ensayo de estabilidad y flujo se prepararon 3 briquetas de cada mezcla (nueve briquetas en total), las cuales se diseñaron según la metodología RAMCODES como se determinó en el capítulo anterior, para la fabricación de las mezclas se debe tener en cuenta aspectos como el peso de los agregados según la gradación escogida, el porcentaje óptimo de asfalto determinado en el polígono de vacíos, la temperatura del asfalto al momento del mezclado, que para este caso es de 146 °C y por otro lado la temperatura de los agregados que debe ser 20°C mayor a la temperatura del asfalto.

Al momento de compactar, el molde debe estar precalentado y en él se debe

depositar 1200 gramos de mezcla, esta debe tener una buena uniformidad y encontrarse a 136°C. Para llevar a cabo la compactación se utilizó el compactador automático Marshall, aplicando 75 golpes por cada cara de la briqueta. Una vez compactadas las nueve briquetas se dejan enfriar para luego ser desmoldadas con un gato hidráulico, paso seguido se toman las medidas de altura y diámetro con un calibrador. Para determinar su gravedad bulk se pesan las briquetas, luego se parafinan y se pesa cada una sumergida en el agua.

En la figura 48. Se observa el proceso para la determinación de la gravedad específica de los especímenes.

**Figura 48.** Determinación de la gravedad específica de los especímenes.



Fuente. la autora

**Resumen del contenido óptimo de asfalto para las tres mezclas.** Una vez determinados los porcentajes de asfalto óptimo para las tres mezclas los valores obtenidos (para la mezcla M-1 el porcentaje óptimo de asfalto fue de 5.31%, la mezcla M-2, el porcentaje óptimo de asfalto fue de 4.60% y el valor para la mezcla M-3, el porcentaje de asfalto fue de 4.31%). Luego se llevó a cabo el ensayo de estabilidad y flujo, se encontró que la mezcla 1 no cumplía con estos parámetros, por su parte la mezcla 2 y 3 no cumplieron con el parámetro de flujo especificado por las normas INVIAS 2013, por este motivo y según la metodología Ramcodes “Cuando la mezcla compacta cumpla con los vacíos y se esté en el paso 5, verificando los parámetros Marshall (estabilidad y flujo) o Superpave (TSR) y no cumple, se determina que tan lejos están los resultados de los parámetros especificados. Con una pequeña variación o ajuste en el contenido óptimo de asfalto (máximo de 0.1 a 0.3% por encima o por debajo del óptimo obtenido inicialmente), puede hacer que esa combinación de agregados cumpla con dichos parámetros. Es necesario fabricar tres nuevos especímenes y comprobar si efectivamente cumplen

con lo exigido”<sup>102</sup> Se decide aplicar este criterio para las tres mezclas y se determinan así, los nuevos porcentajes óptimos de asfalto donde según la metodología RAMCODES se estaría cumpliendo con los criterios de vacíos en la mezcla, con estos nuevos óptimos de asfalto se vuelven a realizar las briquetas y se determina nuevamente su estabilidad y flujo.

En la tabla 41 se aplicó el criterio anteriormente expuesto y se determinan los nuevos porcentajes óptimos de asfalto para cada muestra. Se aprecia que el porcentaje de asfalto para las muestras con escoria son menores al de la muestra convencional

**Tabla 41.** Resumen del contenido óptimo de asfalto para las tres mezclas.

TIPO DE MEZCLA	Pb (%) OBTENIDO EN POLIGONO DE VACIOS	Pb (%) AJUSTADO POR METODOLOGÍA RAMCODES	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )
Mezcla 1	5.3	5.1	2.400
Mezcla 2	4.6	4.3	2.590
Mezcla 3	4.3	4.0	2.766

Fuente. La autora, con base aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño.

Una vez se verificó que los porcentajes de asfalto establecidos en el ajuste de la metodología Ramcodes para cada una de las mezclas cumplían con el parámetro de estabilidad y flujo, se presentan los resultados en la tabla 42.

**Tabla 42.** Valores de flujo y estabilidad corregida para las tres mezclas.

MEZCLA TIPO	ALTURA DE LA BRIQUETA (mm)	ESTABILIDAD (N)	FACTOR DE CORRECCIÓN (INVIAS)	ESTABILIDAD CORREGIDA (N)	FLUJO (mm)	
M1	1	64.147	9859	0.984	9699.53	2.605
	2	63.947	9046	0.989	8944.91	2.589
	3	63.333	10632	1.004	10676.39	2.635
				<b>PROMEDIO</b>	<b>9774</b>	<b>2.610</b>
M2	1	58.463	8536	1.148	9798.63	2.450
	2	57.500	11293	1.180	12142.96	2.475
	3	57.900	11196	1.167	13062.2	2.600
				<b>PROMEDIO</b>	<b>11668</b>	<b>2.508</b>
M3	1	53.117	8520	1.359	11575	2.300
	2	52.677	9623	1.378	13260	2.475
	3	53.543	8980	1.340	12033	2.625
				<b>PROMEDIO</b>	<b>12289</b>	<b>2.467</b>

Fuente. La autora

<sup>102</sup> SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. 2009. Aplicación del Método RAMCODES en el diseño de mezclas Asfálticas de Alto Desempeño. RAMCODES de Venezuela, C.A. 1: 20.

Con los valores obtenidos anteriormente se procede a realizar la verificación para saber si se están cumpliendo con los valores de estabilidad y flujo que están especificados por las especificaciones INVIAS -2013<sup>103</sup> En la Tabla 43, se muestran los valores obtenidos y el chequeo para las tres mezclas en estudio.

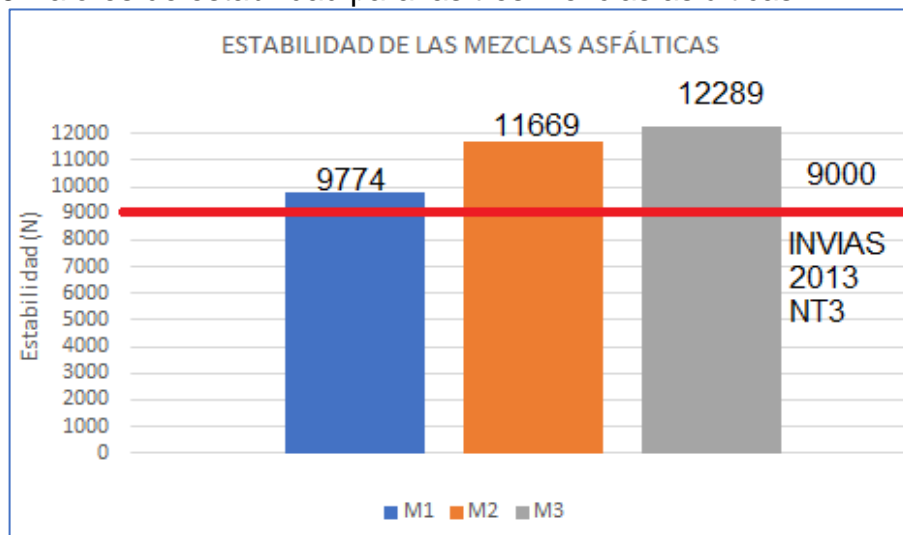
**Tabla 43.** Comparación y chequeo de los valores de estabilidad y flujo según las especificaciones INVIAS 2013.

PARÁMETRO	INVIAS- 2013 NT3	M1	M2	M3	OBSERVACIÓN
Va (%)	4 a 6	4.36	4.27	4.29	cumple
VAM (%)	Mínimo 15	15.89	15.96	16.00	cumple
VFA (%)	65 a 75	72.58	73.24	73.19	cumple
Flujo (mm)	2 a 3.5	2.61	2.38	2.47	cumple
Estabilidad (N)	Mínimo 9000	9774	11669	12289	cumple
Relación Estabilidad/flujo (kN/mm)	3 a 6	3.75	4.9	4.98	cumple

Fuente. La autora

En las Figuras 49 y 50, se presentan a modo de diagrama de barras los resultados obtenidos para las pruebas de estabilidad y flujo respectivamente.

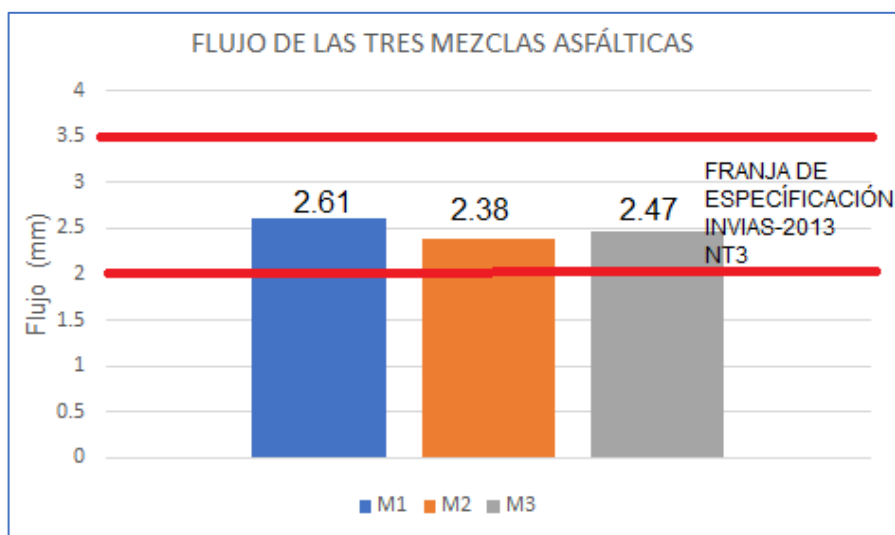
**Figura 49.** Valores de estabilidad para las tres mezclas asfálticas.



Fuente. La autora

**Figura 50.** Valores de flujo para las tres mezclas asfálticas.

<sup>103</sup> INVIAS. Artículo 450-13 Mezclas Asfálticas En Caliente de Gradación Continua. Bogotá D.C. 2013



Fuente. La autora

### 3.5 PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

**3.5.1 Susceptibilidad a la humedad.** Los datos del ensayo que se realizaron a las muestras de acuerdo a la norma INV E-725-13 llamado ensayo de resistencia a la tensión indirecta, Para realizar esta evaluación se elaboraron seis especímenes de acuerdo con la fórmula de trabajo, para cada tipo de mezcla. La compactación se hace de tal forma que se obtenga un contenido de vacíos de aire aproximado entre 6-8 %, se divide la cantidad de especímenes en dos subgrupos; uno se mantiene en condiciones secas y el otro se satura parcialmente en agua. La tabla 44 muestra los valores para la compactación en el equipo Marshall para la mezcla 1.

**Tabla 44.** Valores de carga obtenidos del equipo Marshall para la mezcla 1.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13							
SUBGRUPO HÚMEDO				SUBGRUPO SECO			
Briqueta No.	Carga, P (N)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Briqueta No.	Carga, P (N)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
1	5867.2	6.41	10.150	2	8896	6.39	10.143
5	6271.99	6.25	10.147	3	13345	6.33	10.146
6	5382.35	6.36	10.160	4	17793	6.34	10.138

Fuente. La autora

Luego de obtener los datos mostrados en la tabla anterior se procedió a calcular la resistencia a la tensión de cada una de las briquetas utilizando la ecuación 12, a continuación, en la tabla 45 se presentan los resultados.

**Tabla 45.** Resultados de la resistencia a la tensión para la mezcla 1.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13			
SUBGRUPO HÚMEDO		SUBGRUPO SECO	
Briqueta No.	Resistencia a la tensión (kPa)	Briqueta No.	Resistencia a la tensión (kPa)
1	57409.82	2	66760.81
5	62960.32	3	68872.83
6	53027.36	4	72871.79
<b>PROMEDIO</b>	<b>57799.17</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>69501.81</b>

Fuente. La autora

En la tabla 46 se muestra el resultado de la relación a la tensión de los subgrupos húmedo y seco de la muestra 1

**Tabla 46.** Relación de la resistencia a la tensión de los subgrupos húmedo y seco para la mezcla 1.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13		
R <sub>TH</sub>	R <sub>TS</sub>	RRT
5779.17	69501.81	83.61%

Fuente. La autora

A continuación, se presentan las tablas 47, 48, 49, 50, 51 y 52 correspondientes a la mezcla 2 y mezcla 3, verificando los mismos parámetros.

**Tabla 47.** Valores de carga obtenidos del equipo Marshall para la mezcla 2.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13							
SUBGRUPO HÚMEDO				SUBGRUPO SECO			
Briqueta No.	Carga, P (N)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Briqueta No.	Carga, P (N)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
3	13345	5.79	10.144	1	4448	5.84	10.52
5	22241	5.75	10.153	2	8896	5.75	10.15
6	26689	5.92	10.150	4	17793	5.83	10.15

Fuente. La autora

**Tabla 48.** Resultados de la resistencia a la tensión para la mezcla 2.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13			
SUBGRUPO HÚMEDO		SUBGRUPO SECO	
Briqueta No.	Resistencia a la tensión (kPa)	Briqueta No.	Resistencia a la tensión (kPa)
3	70103.89	1	70660.88
5	79357.24	2	80254.08
6	76535.65	4	92208.26
<b>PROMEDIO</b>	<b>75332.26</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>81041.07</b>

Fuente. La autora

**Tabla 49.** Relación de la resistencia a la tensión de los subgrupos húmedo y seco para la mezcla 2.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13		
R <sub>TH</sub>	R <sub>TS</sub>	RRT
75332.26	81041.07	95.95%

Fuente. La autora

**Tabla 50.** Valores de carga obtenidos del equipo Marshall para la mezcla 3.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13							
SUBGRUPO HÚMEDO				SUBGRUPO SECO			
Briqueta No.	Carga, P (N)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Briqueta No.	Carga, P (N)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
3	6721.26	5.36	10.14	1	8287.03	5.31	10.171
5	7028.19	5.35	10.167	2	8367.1	5.27	10.136
6	6418.78	5.37	10.151	4	9109.95	5.33	10.138

Fuente. La autora

**Tabla 51.** Resultados de la resistencia a la tensión para la mezcla 3.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13			
SUBGRUPO HÚMEDO		SUBGRUPO SECO	
Briqueta No.	Resistencia a la tensión (kPa)	Briqueta No.	Resistencia a la tensión (kPa)
3	6721.26	1	8287.03
5	7028.19	2	8367.1
6	6418.74	4	9109.95
<b>PROMEDIO</b>	<b>6722.73</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>8588.03</b>

Fuente. La autora

**Tabla 52.** Relación de la resistencia a la tensión de los subgrupos húmedo y seco para la mezcla 3.

ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD INV-E- 725-13		
R <sub>TH</sub>	R <sub>TS</sub>	RRT
6722.74	8588.03	78.28%

Fuente. La autora

Finalmente, mediante la tabla 53 se verifica que las mezclas cumplen la norma INVIAS E-725-13 resistencias a la tensión indirecta. (TRS)

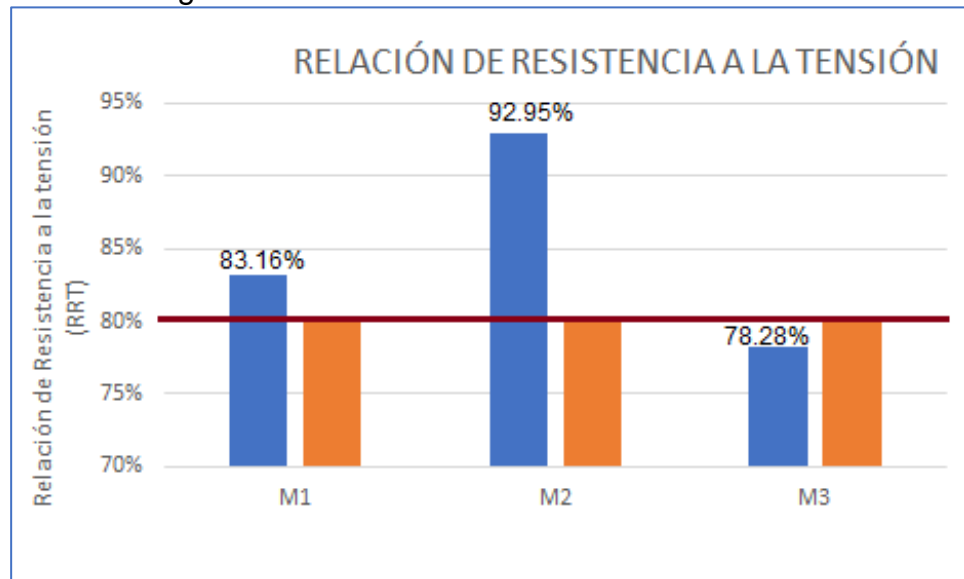
**Tabla 53.** Resultados de la adherencia de las mezclas sometidas a investigación

MEZCLA No.	RRT (%)	INV-E725-13 (%)	OBSERVACIÓN
1	83.16	80	CUMPLE
2	92.95	80	CUMPLE
3	78.28	80	NO CUMPLE

Fuente. La autora

En la figura 51 se muestra la resistencia a la tensión de las tres mezclas comparada con la especificación INVIAS -2013<sup>104</sup>, y la figura 52 muestra los especímenes secos y los húmedos, además de la falla para medir la resistencia a la tensión.

**Figura 51.** Resultados de la relación a la resistencia a la tensión de las mezclas sometidas a investigación



Fuente. La autora

<sup>104</sup> <sup>104</sup> INVIAS. Artículo 450-13 mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2013



**Figura 52.** Equipo y resultado final para determinar la resistencia a la tensión



Fuente. La autora

**3.5.2 Resistencia a la deformación plástica.** A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de la deformación plástica, el cual se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV-E 756 – 13 el cual fue explicado en el capítulo anterior. La temperatura normalizada para el ensayo fue  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y la presión de contacto de la rueda fue de  $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$ . Una vez ensayadas todas las probetas y anotados los valores, se calcularon los valores medios de todas las deformaciones de las mezclas y se llevan a un gráfico en donde se dibuja la curva de deformaciones de las mezclas.

En la Tabla 54 se presentan los valores de las deformaciones de cada una de las mezclas, estos valores fueron registrados en intervalos de tiempos específicos. Inicialmente se registran los valores de deformación en los minutos 1,3 y 5, luego se varía el registro de tiempo cada 5 minutos hasta llegar a 45 minutos, y después el registro se hace cada 15 minutos hasta llegar a 120 minutos.

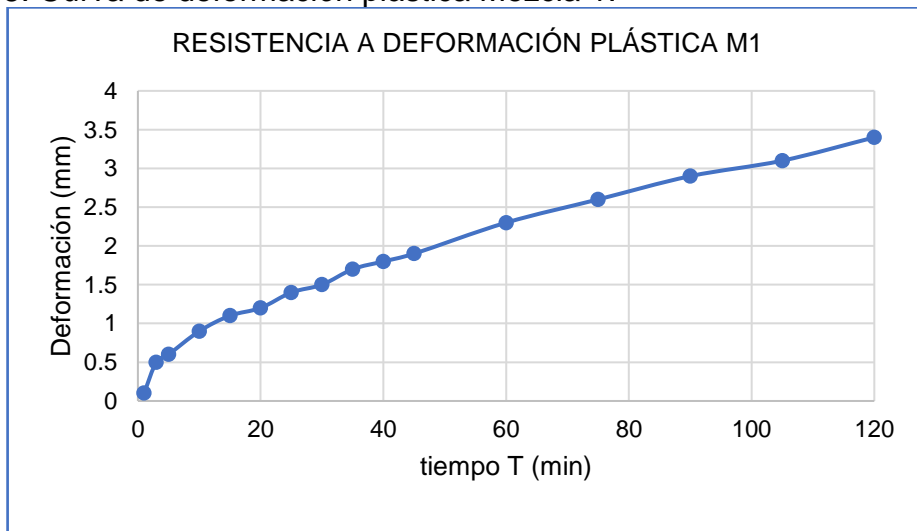
**Tabla 54.** Valores de deformación obtenidos del ensayo de ahuellamiento.

TIEMPO (min.)	DEFORMACIÓN (mm)		
	MEZCLA No. 1	MEZCLA No. 2	MEZCLA No. 3
1	0.10	0.10	0.50
3	0.50	0.90	1.00
5	0.60	1.10	1.30
10	0.90	1.60	1.80
15	1.10	1.90	2.10
20	1.20	2.10	2.40
25	1.40	2.40	2.60
30	1.50	2.60	2.80
35	1.70	2.80	3.00
40	1.80	2.90	3.20
45	1.90	3.10	3.30
60	2.30	3.50	3.70
75	2.60	3.90	4.00
90	2.90	4.20	4.30
105	3.10	4.50	4.50
120	3.40	4.80	4.70

Fuente. La autora

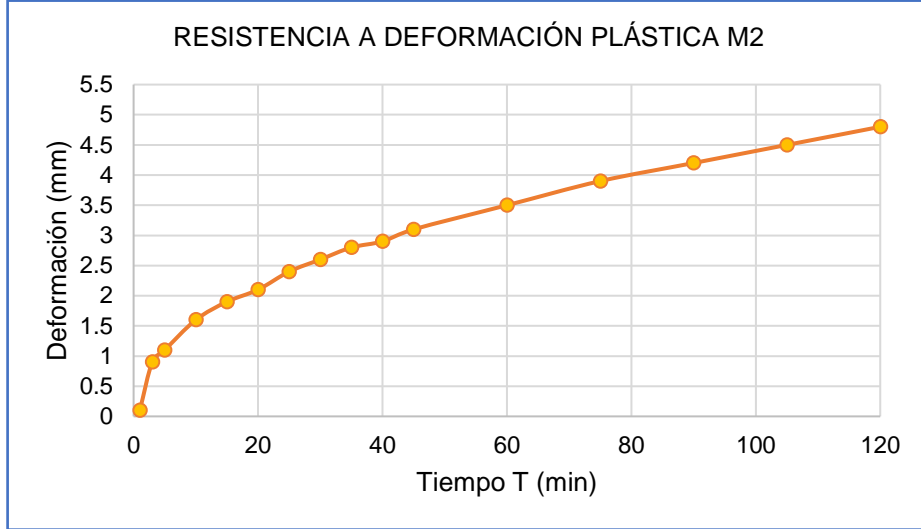
Con los datos de tiempo y deformación de cada una de las mezclas se debe realizar para cada tipo de mezcla una gráfica de deformación Vs tiempo, ver Figuras 53,54 y 55

**Figura 53.** Curva de deformación plástica Mezcla 1.



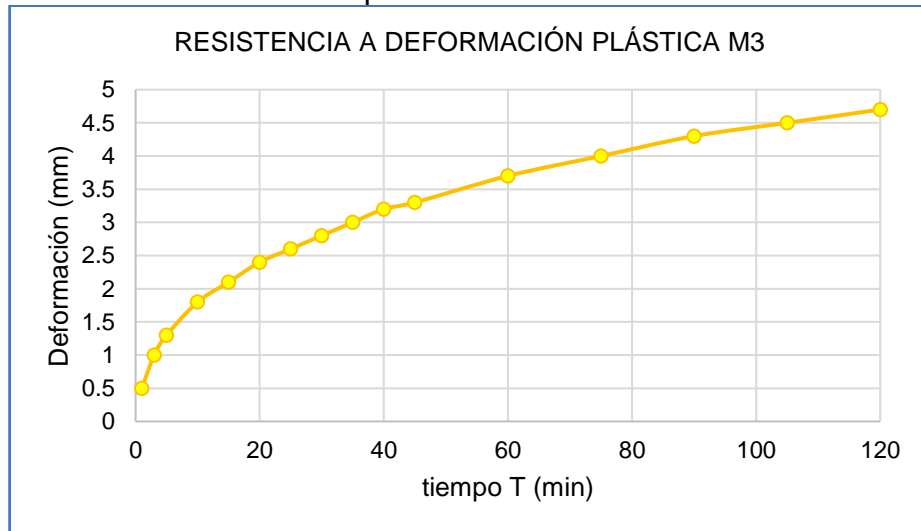
Fuente. La autora

**Figura 54.** Curva de deformación plástica Mezcla 2



Fuente. La autora

**Figura 55.** Curva de deformación plástica Mezcla 2



Fuente. La autora

Luego de graficar para cada mezcla la curva de deformación plástica se debe calcular la velocidad de deformación media utilizando la ecuación 14, en la tabla 55 se presenta los resultados de velocidad de deformación para cada tipo de mezcla.

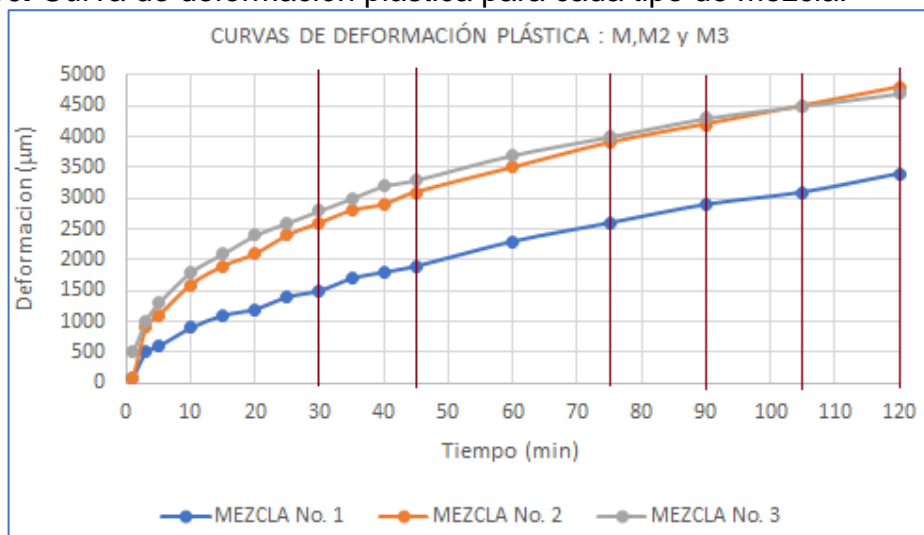
**Tabla 55.** Resultados de velocidad de deformación para cada tipo de mezclas.

TIPO DE MEZCLA	TIEMPO (min)	DEFORMACIÓN (μm)	VELOCIDAD (μm/min)
Mezcla 1	30	1522	30.012
	45	1973	
	75	2734	
	90	3072	22.516
	105	3390	
	120	3691	
Mezcla 2	30	2733	36.385
	45	3278	
	75	4124	
	90	4476	23.458
	105	4796	
	120	5093	
Mezcla 3	30	2417	48.711
	45	3148	
	75	4391	
	90	4944	36.912
	105	5467	
	120	5963	

Fuente. La autora

Con base en los datos de deformación en la figura 56 se observan las curvas de deformación plástica de cada tipo de mezcla, el cual permite apreciar de una manera más precisa el comportamiento de cada una de ellas, en los intervalos de tiempo 30/45, 75/90 y 105/120.

**Figura 56.** Curva de deformación plástica para cada tipo de mezcla.



Fuente. La autora.

**3.5.3 Leyes de fatiga.** El ensayo diametral fue desarrollado y ha sido usado en los EEUU desde los comienzos de la década de los setenta. La versión inglesa del ensayo de fatiga diametral es conocida como el ensayo de fatiga de tensión indirecta (ITFT, por sus siglas en inglés) y puede realizarse en el NAT (Nottingham Asphalt Tester).<sup>105</sup>

Para este ensayo se usó el anexo EN 12697-24:2004 donde se caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometiendo a los especímenes a cargas repetidas, usando el ensayo de tracción indirecta (ITT), por cada mezcla se realizaron ocho briquetas cilíndricas que se expusieron a cargas de compresión repetitivas con una señal de carga de medio senoverso a través del plano diametral vertical.

La aplicación de la carga se hizo dentro de la gama 0.5 kN a 10 kN con una precisión del 0.25%, el desplazamiento a lo largo de un plano diametral horizontal, que mide con una precisión de al menos 1 μm, dentro de una gama de medición de hasta 3.75 mm. La temperatura fue de 20°C ± 1°C.

Para determinar la vida hasta la rotura de las briquetas, la deformación máxima por tracción y el esfuerzo en el centro de la biqueta, se usó la ecuación 22 y 23:

$$\sigma_o = \frac{2P}{\pi * t * \varphi} \quad (22)$$

Dónde:  $\sigma_o$ : es el esfuerzo de tracción en el centro de la biqueta, en (MPa); P: es la carga máxima, en (N); t: es el espesor de la biqueta, en (mm);  $\varphi$ : es el diámetro de la biqueta, en (mm).

$$\varepsilon_o = 2.1 \frac{\Delta H}{\varphi} \quad (23)$$

Dónde:  $\varepsilon_o$ : es la deformación por tracción, en  $\mu\varepsilon$ , en el centro de la probeta;  $\Delta H$ : es la deformación horizontal en (mm).

En la tabla 56 se presentan los resultados del esfuerzo de tracción y la deformación a la tracción de las briquetas.

---

<sup>105</sup> KHALID, H. A. A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous Materials". Materials and Structures, 33(7), 2002. pág. 457-465.

**Tabla 56.** Esfuerzo de tracción y deformación de las briquetas por fatiga

	BRIQUETA	No. CICLOS	ESFUERZO (KPa) (22)	DEFORMACIÓN ( $\mu\epsilon$ ) (23)
M-1	FAT 250-1	14695	220	353
	FAT 250-2	14345	243	359
	FAT 300-1	1944	311	506
	FAT 300-2	3246	310	508
	FAT 320-1	3199	330	508
	FAT 320-2	6235	330	460
	FAT 350-1	2538	360	502
	FAT 350-2	2948	360	496
M-2	FAT 250-1	8317	248	410
	FAT 250-2	7986	254	420
	FAT 300-1	5427	306	464
	FAT 300-2	6121	294	473
	FAT 330-1	3986	338	512
	FAT 330-2	2980	329	517
	FAT 350	1276	357	588
M-3	FAT 250	8984	243	382
	FAT 300-1	5765	301	462
	FAT 300-2	6074	302	441
	FAT 330-1	4017	336	483
	FAT 330-2	3765	334	496
	FAT 350-1	1245	358	592
	FAT 350-2	1114	357	601

Fuente. La autora

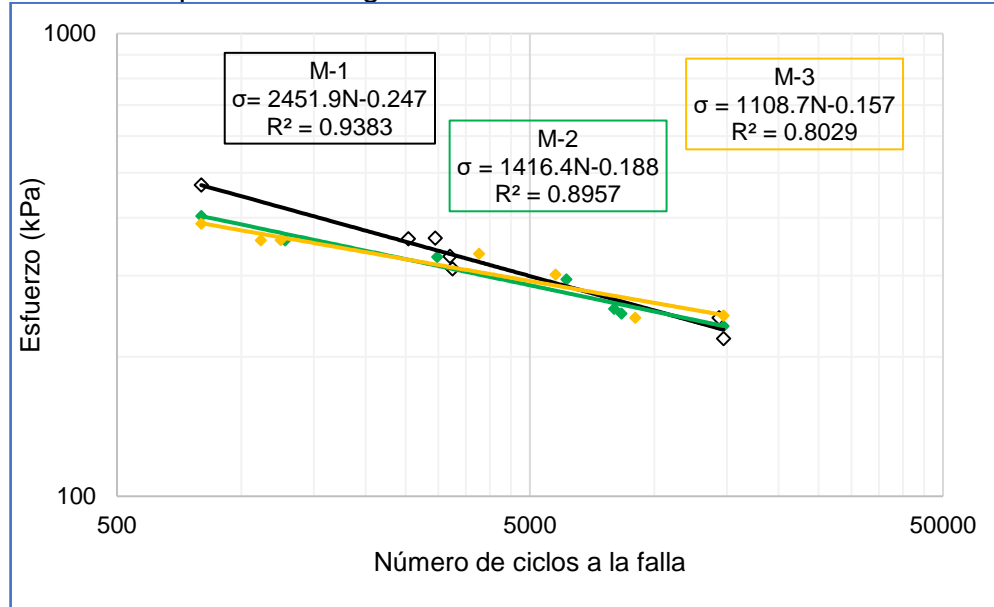
La definición de la deformación horizontal total, se determinó mediante el ensayo de probetas. La relación de la regresión mínimo cuadrática se debe fijar, para el dato del logaritmo de la deformación inicial, como una variable independiente, y el dato del logaritmo de la vida hasta la rotura, como la variable dependiente, de acuerdo a las ecuaciones 24 y 25

$$\log N_f = k + n * \log \epsilon_0 \quad (24)$$

$$N_f = k * \left(\frac{1}{\epsilon_0}\right)^n \quad (25)$$

A continuación, las gráficas 57, muestran el comportamiento de las mezclas en las mezclas 1,2 y 3

**Figura 57.** Desempeño a la fatiga mezcla 1



Fuente. La autora

**3.5.4 Módulo Resiliente.** Los resultados obtenidos después de realizar el ensayo a cada una de las mezclas, siguiendo lo establecido en el anexo NE-12697-26. Se presentan los valores de módulo resiliente obtenidos del equipo NAT para cada una de las mezclas a las temperaturas de 5°, 25° y 40°C, adicionalmente se calculó el módulo resiliente para una temperatura 20°C. El registro de los valores individuales se puede apreciar en los documentos anexos.

Para cada tipo de mezcla se realizaron 9 briquetas, las cuales se halla el valor promedio para cada temperatura este promedio se puede registro en la tabla 57, después, con base en los valores promedios se aplica la técnica de regresión por mínimos cuadrados. Se ajusta a la función matemática de la ecuación 26.

$$Mr = A * eB * T \quad (26)$$

Dónde:  $M_r$ : es el módulo resiliente a la temperatura  $T$ ;  $T$ : es la temperatura de la mezcla; y  $A$  y  $B$  son constantes de regresión.

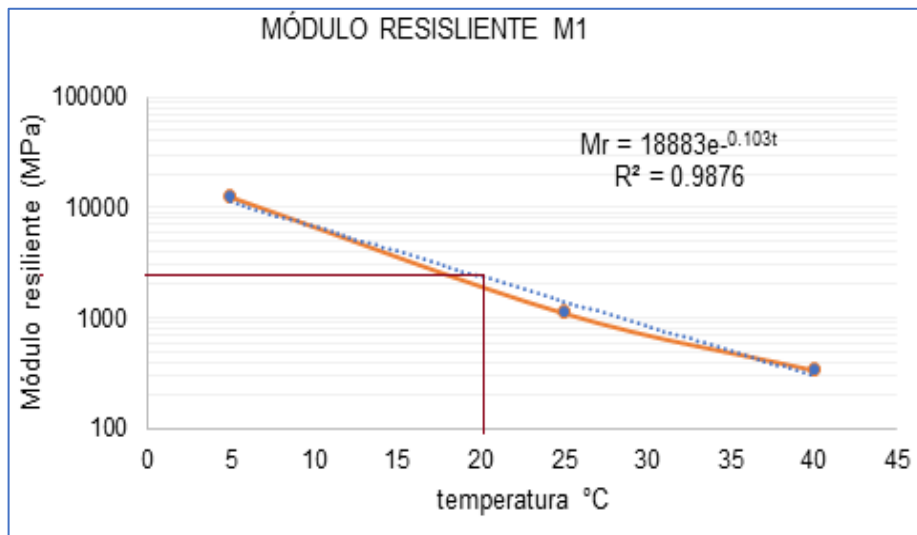
**Tabla 57.** Resultados de módulo resiliente para cada tipo de mezcla.

MÓDULO RESILIENTE (Mpa)			
mezcla No 1	Mr. 5°	Mr. 25°	Mr. 40°
briqueta 1	15181	881	314
briqueta 2	9961	1276	382
briqueta 3	12204	1222	338
<b>Promedio</b>	<b>12449</b>	<b>1126</b>	<b>345</b>
mezcla No 2	Mr. 5°	Mr. 25°	Mr. 40°
briqueta 4	13511	1064	421
briqueta 5	11804	1608	521
briqueta 6	13235	1608	789
<b>Promedio</b>	<b>12850</b>	<b>1427</b>	<b>577</b>
mezcla No 3	Mr. 5°	Mr. 25°	Mr. 40°
briqueta 7	13579	1992	443
briqueta 8	9055	1518	530
briqueta 9	13457	1568	406
<b>Promedio</b>	<b>12030</b>	<b>1693</b>	<b>460</b>

Fuente. La autora

Con las ecuaciones encontradas en la regresión de los datos experimentales se encuentra la línea de tendencia para la Temperatura de la mezcla a 20°C. A continuación, en la tabla 58 se presentan los valores del módulo resiliente para la temperatura de 20 °C A continuación, las figuras 58,59 y 60, se muestran las líneas de tendencia del módulo resiliente de cada una de las mezclas.

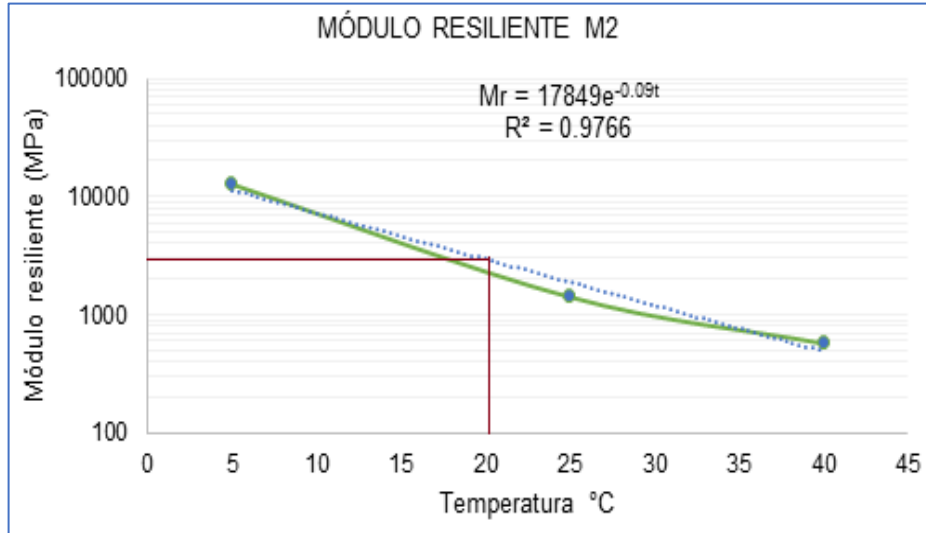
**Figura 58.** Línea de tendencia módulo resiliente M1



Fuente. La autora

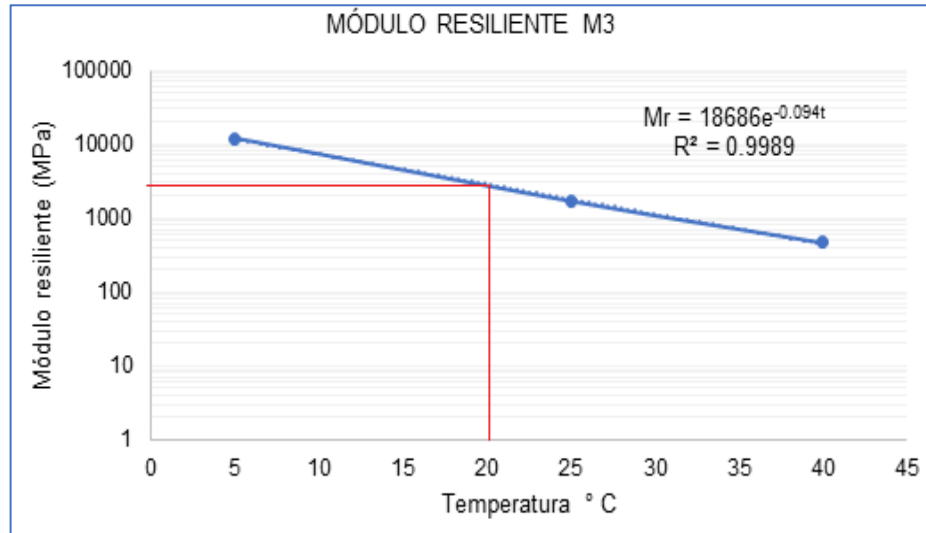


**Figura 59.** Línea de tendencia módulo resiliente M2



Fuente. La autora

**Figura 60.** Línea de tendencia módulo resiliente M3



Fuente. La autora

**Tabla 58.** Resultados de módulo resiliente para cada tipo de mezcla en la temperatura 20°C.

MÓDULO RESILIENTE (MPa)	
Mezcla 1	PROMEDIO
Módulo resiliente. 20°	1786
Mezcla 2	PROMEDIO
Módulo resiliente. 20°	2273
Mezcla 3	PROMEDIO
Modulo resiliente. 20°	2380

Fuente. La autora

## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

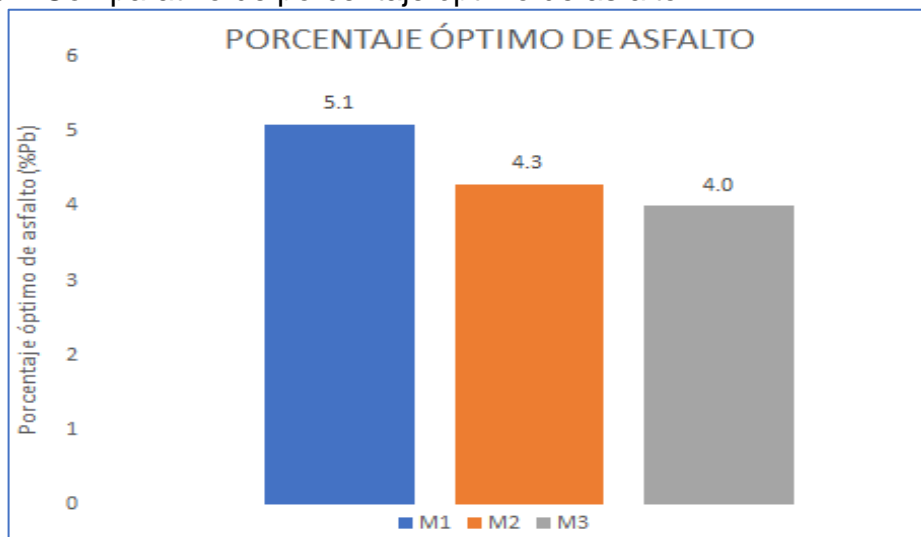
En este capítulo se analizan los resultados del capítulo anterior, para las muestras M1 (convencional), M2 (50% EAF y 50% agregado pétreo) Y la M3 (100% EAF como remplazo del agregado pétreo). Inicialmente se analizarán los resultados técnicos y comparativos de las dos mezclas y la convencional y luego se hará un análisis económico para determinar la viabilidad del uso de la escoria como posible sustituto del agregado pétreo en las mezclas asfálticas.

Para los resultados del uso de la metodología Ramcodes: se compararon los tres tipos de mezclas así:

### 4.2 ANÁLISIS DE ENSAYOS Y PRUEBAS DE DESEMPEÑO

**4.2.1 Porcentaje óptimo de asfalto.** El porcentaje de asfalto de la mezcla convencional fue de 5.1%, la mezcla 2 obtuvo un porcentaje un valor por debajo de 15.68% y la mezcla 3 una diferencia de 21.56% lo que indica que la escoria tiene poca porosidad y hace que los niveles de cemento asfáltico disminuyan. Estos resultados se pueden ver en la figura 61.

**Figura 61.** Comparativo de porcentaje óptimo de asfalto



Fuente. La autora

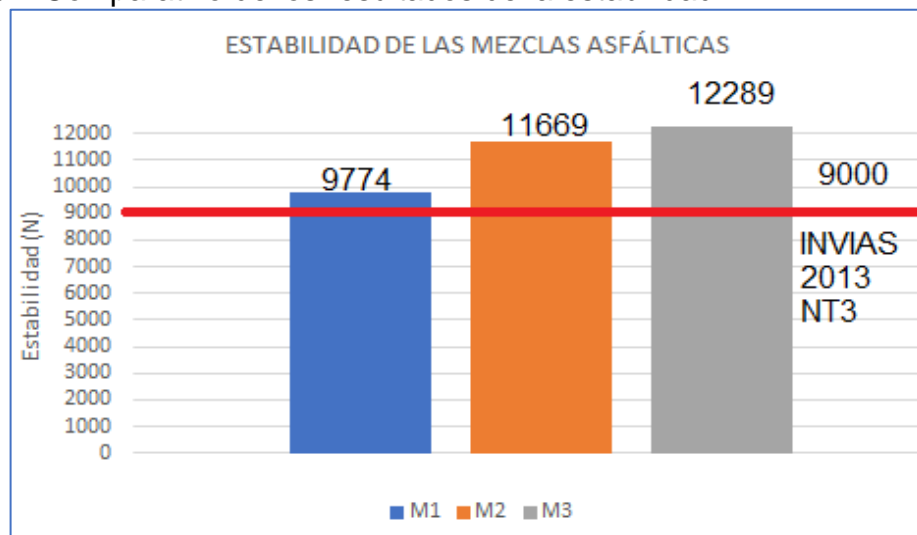
Las metodologías de diseño de mezclas establecen que se deben cumplir con el criterio de estabilidad y flujo, por tanto, es importante comparar en las mezclas estos

parámetros, en cuanto a la estabilidad es importante indicar que la norma 2013 establece un valor mínimo de 9000 N, para un NT3. Y en el flujo determina un rango entre 2 mm y 3.5 mm.

**4.2.2 Estabilidad.** El mejor comportamiento a este parámetro lo obtuvo la mezcla 3 con un valor de 12289 N y la mezcla convencional tuvo un valor muy cercano al límite establecido por la norma INVIAS-2013.

La estabilidad es un valor que permite conocer la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito, esta propiedad se evalúa en términos de fricción y cohesión, la fricción interna depende de las partículas que conforman la mezcla en cuanto a su forma y textura y la cohesión dependerá de la capacidad ligante del asfalto<sup>106</sup> Como se puede apreciar en la figura 62, las tres mezclas cumplen con el criterio de estabilidad indicando una buena fricción entre el agregado y el asfalto.

**Figura 62.** Comparativo de los resultados de la estabilidad



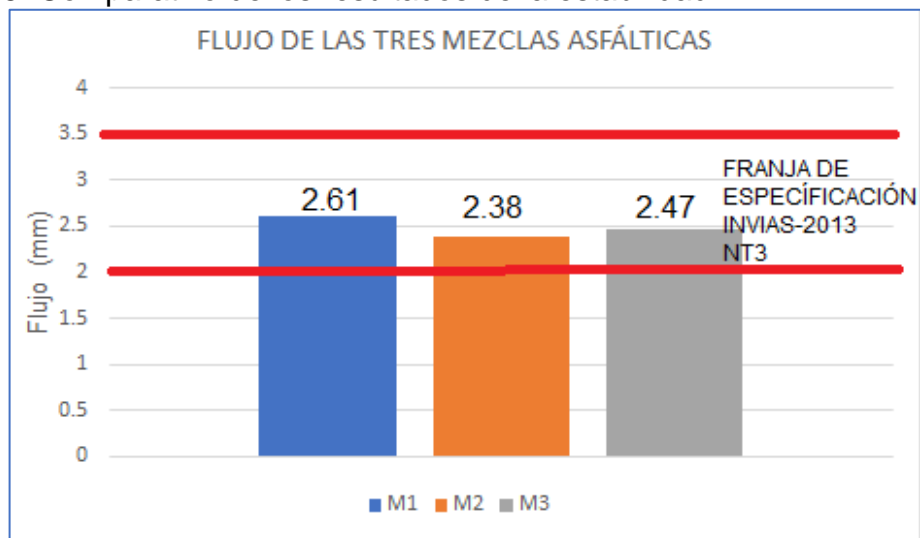
Fuente. La autora.

**4.2.3 Flujo.** El valor de flujo indica la deformación de la briqueta en centésimas de pulgada y representa la disminución del diámetro vertical de la briqueta. Las deformaciones permanentes de las capas asfálticas se pueden atribuir a problemas en el valor de flujo, como se ve en la figura 63, las tres mezclas están dentro del

<sup>106</sup> CÁCERES, Carlos A. Análisis de la metodología Superpave para el diseño de mezclas asfálticas En México. México. 2007.

criterio de verificación del INVIAS (2 a 3.5 mm), por lo que no deberían presentar dicho problema, sin embargo, en la mezcla 3 el valor es el menor y anteriormente el valor de la estabilidad fue mayor y según (Garnica, et al., 2004) cuando los valores de estabilidad son muy altos y los de flujo bajos la mezcla es susceptible al agrietamiento. En la gráfica se puede ver que la mezcla 2 presenta un valor de 2.38 y su estabilidad también fue la media se puede deducir que presenta el mejor comportamiento de las tres.

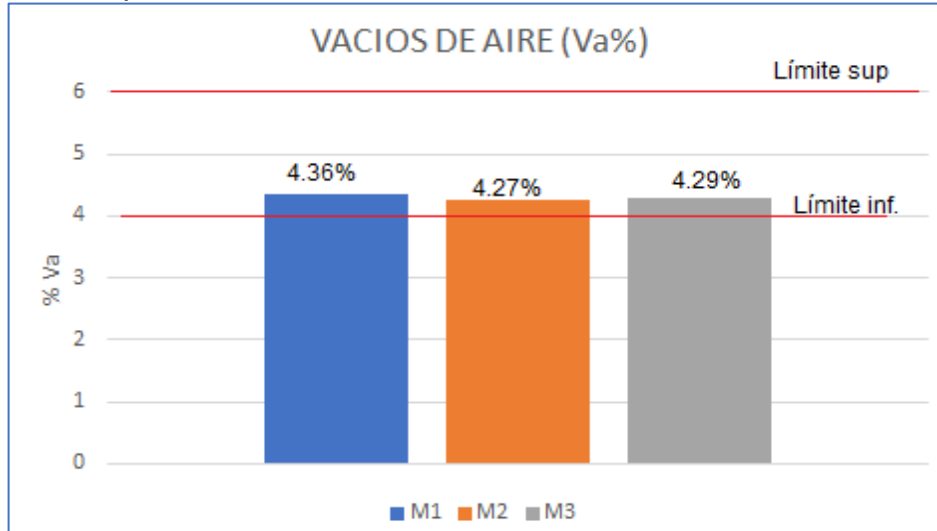
**Figura 63.** Comparativo de los resultados de la estabilidad



Fuente. La autora

**4.2.4 Vacíos de aire.** Los vacíos de aire en las tres mezclas se ubicaron dentro del rango permitido por el (INVIAS 2013a), que en el artículo 450. El cual especifica que su valor para un tránsito NT3,  $V_a$  (%) debe estar entre (4-6), la figura 64 muestra que las tres mezclas tienen porcentajes dentro de ese rango. Aunque se puede decir que el contenido de vacíos de aire está muy cercano en al límite inferior en las tres mezclas, contribuyendo a una posible exudación del asfalto.

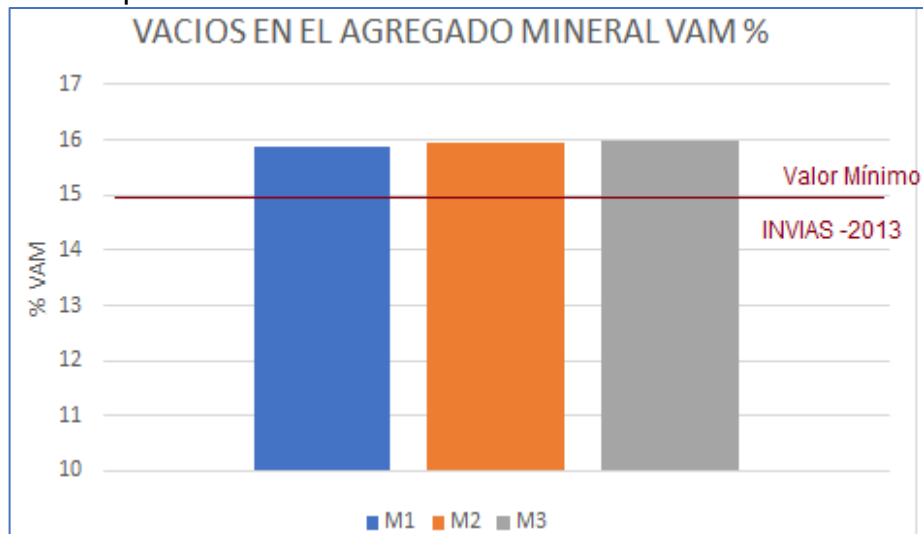
**Figura 64.** Comparativo de vacíos de aire en las mezclas



Fuente. La autora

**4.2.5 Vacíos del agregado mineral.** Los vacíos en el agregado mineral en las tres mezclas se ubicaron por debajo del valor permitido por el (INVIAS 2013a), que en el artículo 450, estipula que debe VAM (%) para el tránsito NT3 es 15%. En la figura 65 se aprecian los valores el mayor porcentaje lo presentó la M3, con un valor de 15 % y el menor lo presentó la M1 con un valor de 15.89, se evidencia el comportamiento muy similar entre la M2 y M3 con respecto a este parámetro.

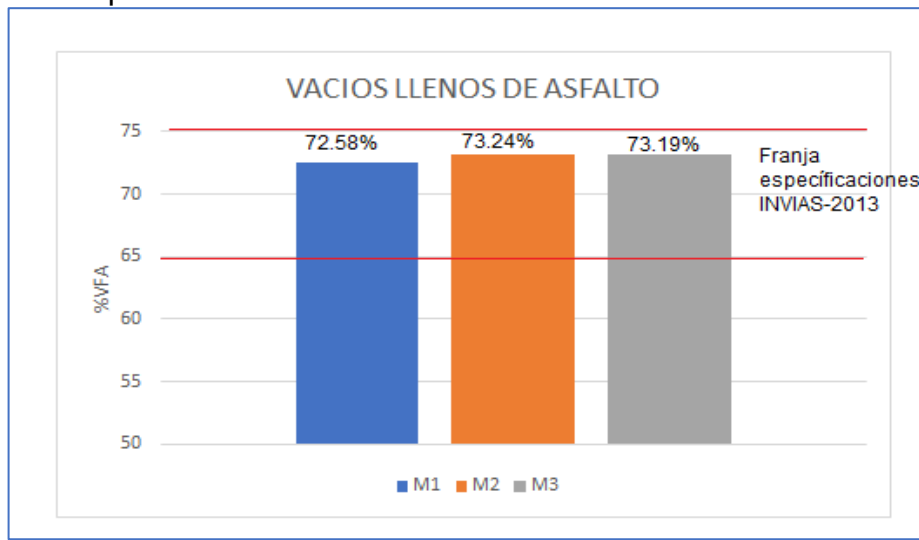
**Figura 65.** Comparativo de vacíos de aire en las mezclas



Fuente. La autora

**4.2.6 Vacíos llenos de asfalto.** Los vacíos llenos de asfalto en las tres mezclas se ubicaron dentro del rango estipulado (INVIAS 2013a), que en el artículo 450, VFA (%), para tránsito NT3 es (65 -75)%. La figura 66, muestra que el menor porcentaje lo obtuvo la mezcla 1 y que el comportamiento de las mezclas 2 y 3 es muy cercano. Lo que establece que la escoria es menos porosa que los agregados.

**Figura 66.** Comparativo de vacíos llenos de asfalto en las mezclas

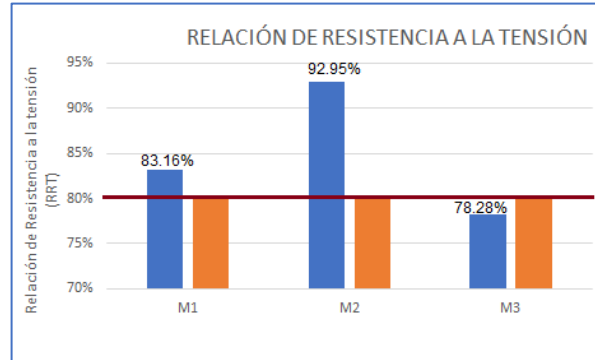


Fuente. La autora

**4.2.7 Susceptibilidad a la humedad.** La relación de la resistencia a tensión de los diferentes diseños de los tres tipos de mezclas asfálticas se muestra en la figura 67, donde se evidencia que la mezcla 3 está por debajo de valor mínimo 80% representado en la figura con la barra de color naranja que es el establecido en el criterio del INVIAS -2013<sup>107</sup>, pero también se verifica que el resultado de la mezcla M2 es de 95.95% lo cual se puede atribuir que en el ensayo de degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, la escoria tuvo un valor de 12.35% mientras que en la grava fue de 22.17%, que determinaría mejor comportamiento de la M2 a la susceptibilidad a la humedad.

<sup>107</sup> INVIAS. Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2013

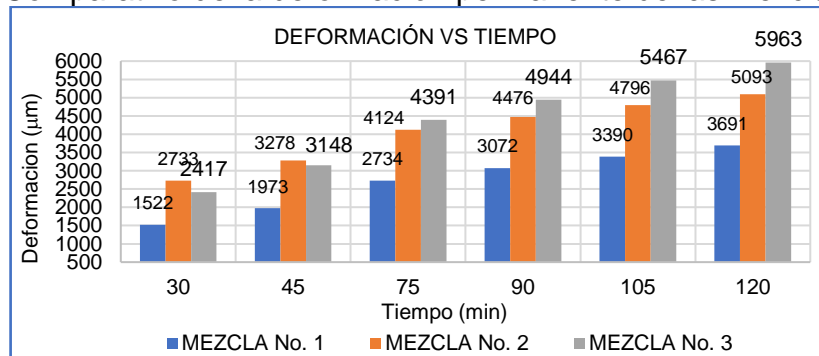
**Figura 67.** Comparativo de la relación de la resistencia a la tensión



Fuente. La autora.

**4.2.7 Resistencia a la deformación plástica.** El ahuellamiento ocurre principalmente debido a una deformación permanente de las capas de pavimentos o de la subrasante, generada por la deformación plástica del concreto asfáltico o por la deformación de la subrasante debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas. (INVIAS 2006). La deformación presentada por las mezclas a en los tiempos determinados se muestran en la figura 68.

**Figura 68.** Comparativo de la deformación permanente de las mezclas



Fuente. La autora

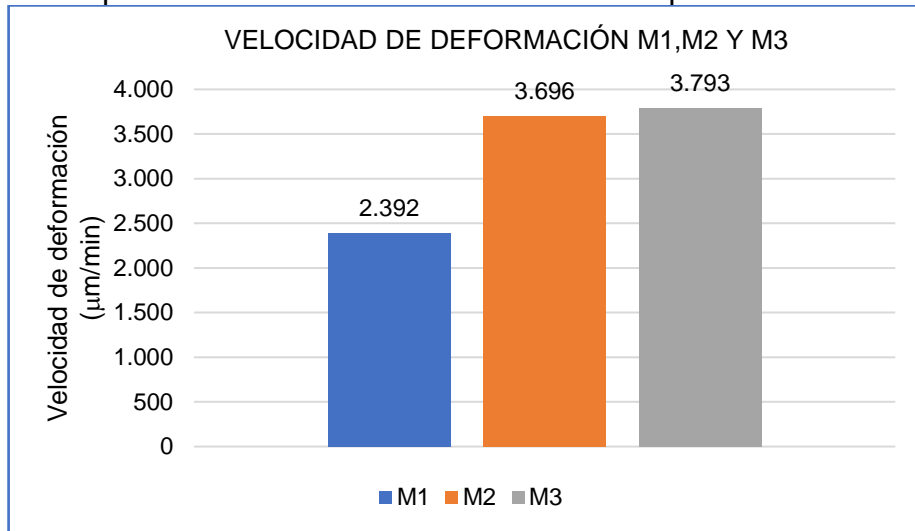
Como se observa en la Figura 68, la Mezcla 1 es la que presenta una menor deformación, estos valores durante el transcurso de duración del ensayo aumentan de forma constante y durante los últimos minutos tienden a tener un movimiento uniforme.

Las mezclas 2 y 3 que son las mezclas modificadas con la escoria, y se observa en el gráfico que presentan una mayor deformación y se puede deducir que este comportamiento se debe a la forma y textura de la mezcla ya que se presenta una menor fricción entre las partículas en comparación a la mezcla convencional. Como el ensayo se realiza a una temperatura de 60°C las mezclas presentan un

comportamiento viscoso lo que influye también en que las deformaciones iniciales sean más significativas.

En la figura 69, la cual se presentan los resultados del cálculo de la velocidad de deformación para cada una de las mezclas que fueron objeto de estudio, se pudo observar que las dos mezclas modificadas con escoria obtienen un comportamiento similar. La velocidad de deformación en las tres mezclas presentada en el rango de 105 a 120 minutos. La máxima velocidad de deformación que establece la norma INVIAS -2013 para la temperatura media ambiente menor a 24°C es de 15  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Indica que las tres mezclas cumplen con el parámetro.

**Figura 69.** Comparativo de la velocidad de deformación permanente de las mezclas



Fuente. La autora.

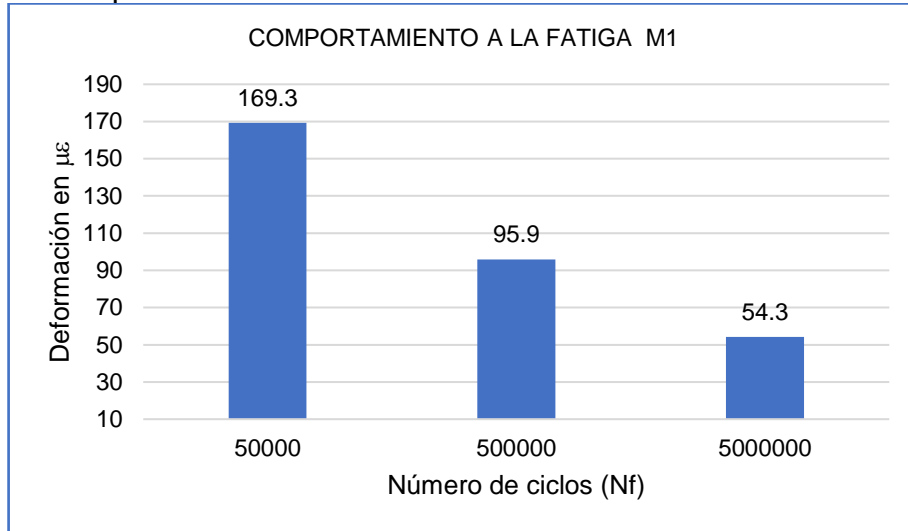
**4.2.8 Leyes de fatiga.** La fatiga de mezclas asfálticas es un proceso de cambio estructural permanente y progresivo que ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos y deformaciones de amplitudes variables y tiene como resultado la aparición de fisuras que conducen luego a una fractura total del material debido a la aplicación de un número determinado de repeticiones o ciclos.<sup>108</sup>

A continuación, se presenta en las figuras 70, 71 y 72, el comportamiento a la fatiga de las mezclas M1, M2 y M3, para los ciclos de carga de  $5 \times 10^4$ ;  $5 \times 10^5$  y  $5 \times 10^6$ , la deformación en  $\mu\epsilon$ .

<sup>108</sup> SILVA VERA, Jonathan. Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión, 2012. pág. 136.

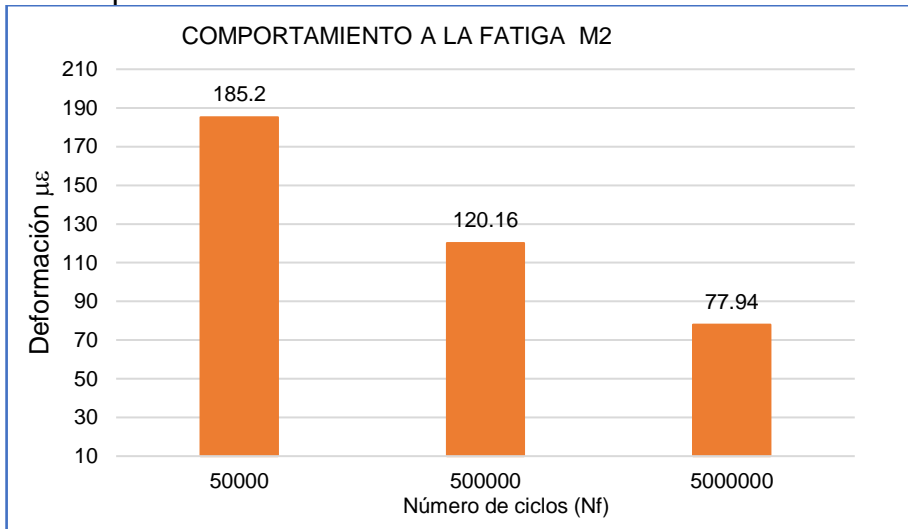


**Figura 70.** Comparativo de la deformación vs número de ciclos M1



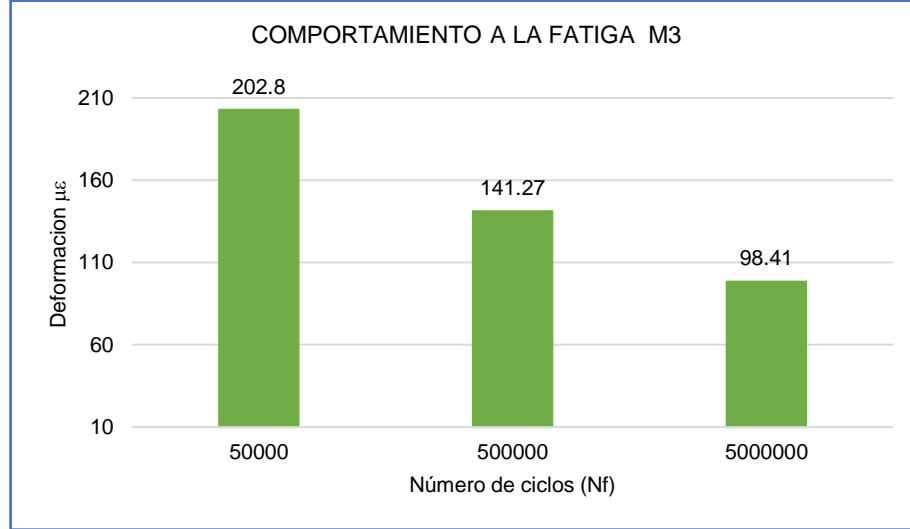
Fuente. La autora.

**Figura 71.** Comparativo de la deformación vs número de ciclos M2



Fuente. La autora.

**Figura 72.** Comparativo de la deformación vs número de ciclos M3



Fuente. La autora.

Para el primer ciclo de carga, la M1 obtuvo una deformación de 169.3  $\mu\epsilon$ , la M2 incremento su deformación en un 9.39% con un valor de 185.2, y la M3 lo incremento en un 19.78% con un valor de 202.8, igualmente, al aumentar los ciclos de carga el valor de las deformaciones aumenta respecto a la M1. Evidenciando un mejor comportamiento a la fatiga de las mezclas modificadas con EAF, estos resultados reafirman lo citado por<sup>109</sup> en su artículo de la revisión del uso de las escorias, los autores describen los resultados de las pruebas a la fatiga en mezclas usadas con EAF y los resultados son los siguientes: “para Kavussi y Qazizadeh, la vida de fatiga obtenida de varios métodos, basados en pruebas de fatiga por flexión de cuatro puntos, confirmaron que las mezclas que contenían escoria EAF tenían una mayor vida útil. Esto se atribuyó a la alta angularidad de la escoria, que aumenta el ángulo de fricción interna de la mezcla y mejora el enclavamiento de las partículas, así como una mejor adhesión de la escoria al asfalto, fortaleciendo la interfaz y ralentiza el agrietamiento”, los mismos autores citan otros resultados como Ziari et al., 2015, quienes declaran que, en general, la escoria de acero aumenta la vida de fatiga de las mezclas cuando se usa en la fracción gruesa o fina, pero las pruebas del haz de cuatro puntos en mezclas de escoria al 100% mostraron resultados inaceptables. Y por último citan a Wen y Col., 2016, quienes describen que el agrietamiento por fatiga de arriba hacia abajo, la resistencia de las mezclas no se vio afectada por la adición de escoria de acero hasta el 60% de agregados. Para el resultado de esta investigación el comportamiento de la mezcla M2 presenta una vida de fatiga mejor que la de la convencional M1.

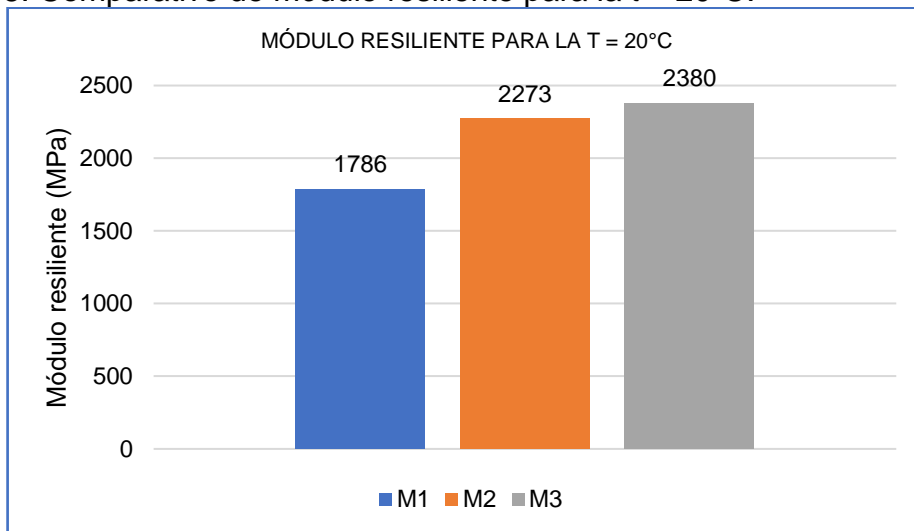
<sup>109</sup> SKAF, Marta, MANSO, Juan M.; ARAGÓN, Ángel; FUENTE-ALONSO, José A ORTEGA-LÓPEZ, Vanesa. EAF Slag in Asphalt mixes: a brief review of its possible re-use.” resources, Conservation and Recycling 120. 2017 pág. 176–85. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>.

**4.2.9 Módulo Resiliente.** En la revisión de la literatura, en una publicación realizada por<sup>110</sup> cita el concepto de módulo resiliente a Hveem, 1955, el cual desarrolló el tema “comportamiento resiliente del pavimento” quien propuso la prueba del estabilómetro para caracterizar a las subrasantes. Luego Seed y sus colegas en la Universidad de California en Berkeley siguieron lo establecido por Hveem. Desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia, pero fue finalmente Seed et al., 1962, los que definieron que el módulo resiliente; como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable, siendo este equivalente al módulo de Young (módulo de elasticidad).

En los ensayos realizados para la determinación del módulo resiliente de las mezclas investigadas, se tuvo en cuenta la temperatura como factor que influye en la determinación del mismo. <sup>111</sup> realizaron una investigación donde la temperatura fue el principal factor que determinaba el comportamiento del módulo resiliente en las mezclas asfálticas.

En la figura 73 se muestra el comparativo del módulo resiliente para 20°C temperatura de mezcla, de cada una de las mezclas estudiadas.

**Figura 73.** Comparativo de módulo resiliente para la  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .



Fuente. La autora.

<sup>110</sup> MORENO, Javier. CAPÍTULO 4 El Módulo resiliente." In, 2005. pág. 28

<sup>111</sup>KIM, Y R, K A SHAH, KHOSLA, N P. Influence of test parameters in SHRP P07 procedure on resilient moduli of asphalt concrete field cores." Transportation Research Record, No. 1353. 1992

La mezcla M2 obtuvo un módulo resiliente superior a la mezcla M1 convencional en un 27.26% y la mezcla M3, obtuvo un módulo resiliente superior a la mezcla M1 de 33.25%. se puede atribuir que las EAF presentan una mayor angularidad y adhesión superficial. En el estudio realizado por<sup>112</sup>, los resultados del módulo resiliente a temperaturas de 25°C y 40°C de las muestras con EAF presentan mayor angularidad y mejores propiedades de enclavamiento, físicas y mecánicas y también mejor adhesión superficial

#### 4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico se efectúa con el fin de determinar si es posible el uso de la escoria investigada. Se realizó cálculo del valor unitario por metro cúbico de la elaboración en una planta de cada una de las mezclas, y así comparar su factibilidad.

Para elaborar este análisis los precios unitarios fueron tomados con base en los APU (Análisis de Precios Unitarios) para el año 2019, del Instituto Nacional de Vías (INVIAS)<sup>113</sup> para el departamento de Boyacá. Es necesario aclarar que no se incluyeron los costos de transporte de material debido a que la planta de fabricación se considero estaba ubicada en la ciudad de Tunja.

En la tabla 59 se presentan los precios para cada uno de los materiales en el sitio de producción y la distancia de acarreo hasta la ciudad de Tunja.

**Tabla 59.** Distancia y precio de adquisición de materiales

MATERIAL	DISTANCIA ACARREO (Km)	UNIDAD	PRECIO
Grava	56	m <sup>3</sup>	\$ 56.600
Arena	56	m <sup>3</sup>	30.500
Arena triturada	56	m <sup>3</sup>	43.000
EAF	25	m <sup>3</sup>	18.000*
Cemento Asfáltico 60 -70	125	Ton	1.238.700

\*Dato suministrado por el Ingeniero Yuber Oswaldo Acosta, ing. Control ambiental Gerdau -Diacó Fuente. La autora.

En la tabla 60 se presentan los precios unitarios por metro cúbico de cada una de las mezclas. En el anexo D, se muestran el análisis de precios unitarios.

<sup>112</sup> MASOUDI, Sajjad; SAYYED Mahdi Abtahi, AHMAD Goli. Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. Construction and Building Materials 135. 2017. pág. 260–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>.

<sup>113</sup> INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Sección 400 - Concreto Hidráulico. Manual de normas de Ensayos de materiales para carretera.2013

**Tabla 60.** Precio unitario de cada mezcla por m<sup>3</sup>.

ID. MEZCLA	PRECIO UNITARIO
M-1	\$ 365.078
M-2	\$ 351.132
M-3	\$ 320.595

Fuente. La autora

#### 4.4 ANÁLISIS AMBIENTAL.

Debido a la preocupación global por el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales, nosotros como ingenieros, debemos buscar alternativas ecoeficientes para el desarrollo de nuestras labores cotidianas. Esta investigación busco la alternativa del uso de EAF como remplazo del agregado pétreo en las mezclas MDC-19, para entrar en el contexto mundial los productores de acero presentan sus co-productos y sus usos<sup>114</sup>, los cuales van desde escorias, lodos de polvo, productos químicos, emulsiones en aceite y gases.

La asociación mundial del acero nos documenta sobre la cantidad de escoria EAF producida por la industria del acero en el año 2016, la cual fue de 16.9 Kg/ton de la producción total acero crudo.<sup>115</sup> Con base en este estimativo, Colombia para el año 2017, a nivel mundial en producción de acero ocupa el puesto 49 y su producción fue de 1.3 millones de toneladas<sup>116</sup>, la producción de escoria EAF fue de 76923 toneladas, los cuales en su gran mayoría se almacenan sin un uso específico.

Además, en la figura 74, se hace referencia a los usos de los co-productos de la industria del acero en Europa en el año 2016, teniendo en cuenta que estos porcentajes varían a nivel mundial de región en región. Los coproductos de la industria del acero tienen muchos usos dentro de muchos campos, en algunos casos son sus propiedades físicas las que determinan su uso; como las escorias que son utilizadas en el campo de la construcción de vías; en Europa son muy usadas debido a sus propiedades químicas en el procesamiento de sus gasees como combustible para producir calor y/o electricidad en Colombia no se ha investigado y reglamentado su uso.

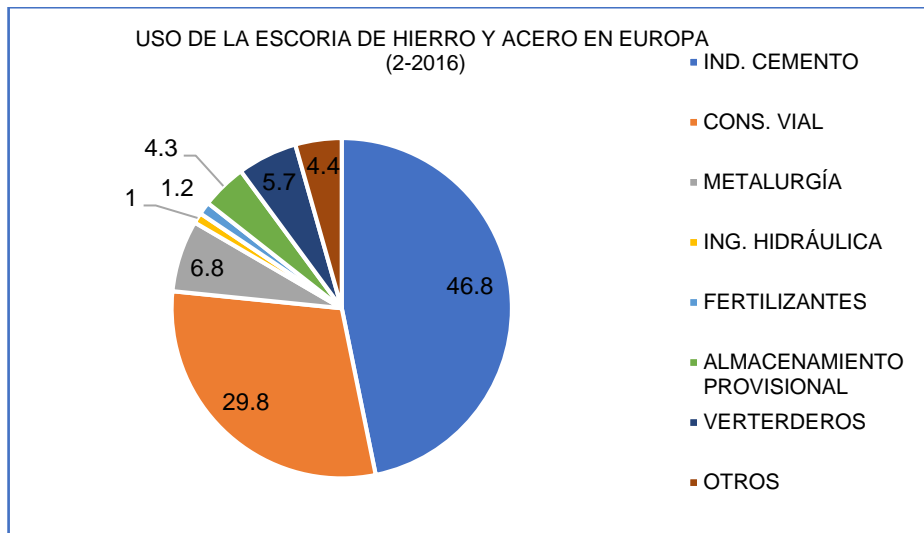
---

<sup>114</sup> Ibidem.

<sup>115</sup> WORLDSTEEL, ASSOCIATION. Steel industry Co-Products. 2018/

<sup>116</sup> BASSON, Edwin. World Steel in Figures 2018. World Steel Association, 2018. pág. 3–29.

**Figura 74.** Uso de las escorias de hierro y acero en Europa en segundo semestre de 2016



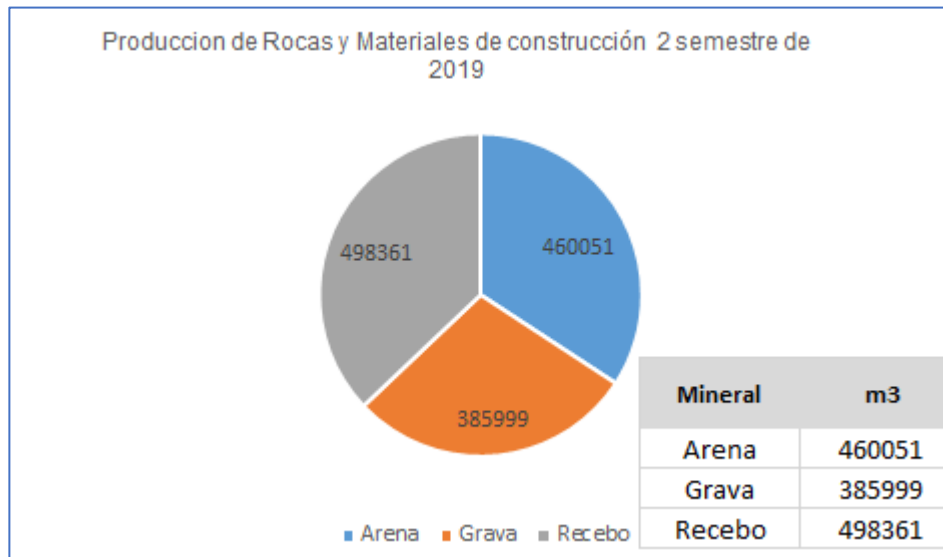
Fuente. La autora con base en Steel Industry Co-Products. 2018.

El Ministerio de Minas y Energía a partir del año 2004 designó a Ingeominas como autoridad minera en Colombia, y es esta entidad la cual con base en el código de minas o Ley 685 de 2001, controla la reglamentación sobre los distintos roles que interactúan en el desarrollo de las actividades mineras como son: prospección, explotación, construcción y montaje, explotación, aprovechamiento y comercialización en la riqueza del subsuelo. acción de materiales de construcción y minerales industriales (no metálicos), van desde la explotación subterránea, minería a cielo abierto y minería aluvial. Todas estas actividades se realizan mediante procesos físicos consistentes en el arranque mecánico y posterior cargue para su transporte. La extracción en cielo abierto implica uso de maquinaria como retroexcavadoras y buldóceres para el arranque del material en laderas, y para la conformación de bancos para manejar la estabilidad de las mismas, la extracción aluvial se realiza mediante dragas y retroexcavadoras que extraen el material del lecho del río y lo cargan directamente a volquetas.

La agencia nacional de minería nos presenta el informe de producción de rocas y materiales de construcción acumulado para el 2 semestre de 2019 y sus cifras son: Arena 460.051 m<sup>3</sup>, grava 385.999 m<sup>3</sup> y recebo 498.361 m<sup>3</sup>. A continuación, en la figura 75 se presenta una comparación del ahorro estimado en material pétreo, si

se reemplaza por escoria EAF producida en Colombia.<sup>117</sup>

**Figura 75.** Producción de rocas y materiales de construcción a 2 segundo semestre de 2019



Fuente. La autora con base en la Agencia Nacional de Minería

La producción de escoria EAF como se dijo anteriormente en Colombia corresponde a 76920 m<sup>3</sup> aproximadamente, lo cual significaría que se reduciría la explotación minera en una cifra aproximadamente del 19% de grava.

Lo anterior define un panorama de riesgo de los recursos no renovables, es importante minorar la explotación del recurso y reemplazar en gran medida los materiales pétreos por escorias, contribuyendo a la conservación del medio ambiente y hacer uso de los co-productos de la industria del acero como se hace en los países europeos

---

<sup>117</sup> AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA. Producción rocas y materiales de construcción. I Trimestre 2019. Disponible: <https://www.anm.gov.co/?q=content/producci%C3%B3n-nacional-rocas-y-materiales-de-construcci%C3%B3n-i-trimestre-2019>.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación era el análisis experimental para evaluar el comportamiento de una mezcla MDC-19 con el remplazo del 50 % y el 100% del agregado grueso por EAF. Los resultados obtenidos una vez terminada, permitieron concluir que si es factible el remplazo planteado.

Así pues, en este capítulo mostraremos una a una las razones por las cuales se determinó la eficiencia de las EAF en las mezclas asfálticas estudiadas:

Las propiedades físicas y mecánicas de las escorias cumplieron con los parámetros establecidos por las especificaciones del Instituto Nacional de Vías de Colombia, en su reglamento vigente, y para el nivel de tránsito establecido. Inicialmente en el ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles la escoria presentó un valor de 15.86% comparado con la grava que fue de 23.41% implicando mejor comportamiento ya que la norma INVÍAS-2013, establece un valor de 25% máximo. Igualmente, en el ensayo a la resistencia utilizando el equipo Micro Deval, el valor obtenido por la EAF fue de 12.35% y la grava fue 22.17% lo que corresponde a un 44.29% por debajo del resultado de la grava, haciendo más resistente a la abrasión y durabilidad que el del agregado.

En cuanto a la metodología Ramcodes que permite un diseño de mezcla de manera rápida ya que la cantidad de especímenes necesarios para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto se reduce a solo mínimo 3 briquetas por tipo de mezcla, se estableció el polígono de vacíos de la manera estipulada por la metodología y se cumplieron las propiedades volumétricas de las mezclas cumpliendo con los valores establecidos por la norma INVIAS – 2013<sup>118</sup>, a continuación, se relacionan así: el porcentaje establecido por la norma para los vacíos de aire VA (%), en la mezcla debe estar entre 4 a 6, la M1 obtuvo un resultado de 4.36%, la M2 fue de 4.27% y la M3 fue de 4.29% lo que significa que las mezclas modificadas con EAF, disminuyeron comparadas con la mezcla M1, contribuyendo a un menor porcentaje de cemento asfáltico como se evidencia en la M3 el porcentaje óptimo de asfalto 4.45%, la M2 fue de 4.75% y la muestra M1 fue de 5.41%. estos resultados son coherentes con las demás propiedades volumétricas de las mezclas, los vacíos del agregado mineral VAM (%), las cuales con respecto a la mezcla convencional aumentaron y los vacíos llenos de asfalto VFA (%), de las mezclas M2 y M3 aumentaron con relación a la M1.

---

<sup>118</sup> Ibidem



En el ensayo de estabilidad y flujo: los valores de la estabilidad se encuentran cumpliendo con el valor establecido por el INVIAS -2013<sup>119</sup>, siendo el valor de la M1 es más cercano al límite definido por la norma, sin embargo, en el flujo la M1 presento el valor más alto, nuevamente acorde al contenido óptimo de asfalto, el cual en la M1 fue mayor.

La susceptibilidad a la humedad de la M1 dio como resultado 83.16% que con relación al límite establecido por la norma 80% está muy cercano y lo mismo ocurrió con la M3 cuyo resultado fue 78.28% no cumpliendo con el parámetro, lo que posiblemente se debe a que la mezcla M3 está conformada 100% por EAF en remplazo del agregado, y debido a su composición mineralógica la hace menos resistente a la humedad. La M2 por su parte, cumplió con un valor adecuado 95.95% a este requerimiento, lo que la hace la más eficiente a la susceptibilidad a la humedad.

La resistencia a la deformación plástica nos permite estimar el comportamiento futuro de la mezcla en relación a las deformaciones permanente, la M1 presento menores deformaciones, las M2 y M3 los valores de las deformaciones fueron muy cercanas y con valores mayores a la mezcla convencional. La velocidad de deformación en las tres mezclas presentada en el rango de 105 a 120 minutos, indica que las tres mezclas cumplen con el parámetro, pues la máxima velocidad de deformación que establece la norma INVIAS -2013<sup>120</sup> para la temperatura media ambiente menor a 24°C es de 15  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

En relación con la fatiga de las mezclas, la mezcla M1 presentó menores deformaciones con relación al número de ciclos de carga. En las mezclas M2 y M3 estas aumentaron con relación a la M1. Se obtuvo un resultado muy similar al de los investigados<sup>121</sup> quienes afirman que al determinar el número de ciclos de carga que soportará la mezcla antes de que se fisure, o sea, su resistencia a la fisuración por fatiga, a mayor deformación de rotura, mayor deformación crítica y mayor módulo de rigidez, lo que implica una mayor resistencia a la fisuración por fatiga, es decir, una mezcla que soporta un mayor de número de ciclos de carga antes de la fisura.

---

<sup>119</sup> Ibidem

<sup>120</sup> INVIAS. 2013a. "Artículo 450-13 Mezclas Asfálticas En Caliente de Gradación Continua." Bogotá D.C.

<sup>121</sup> PALMA, Gabriel Carlos; WAHR, Félix; PÉREZ, y VLADIMIR Estay, Estudio del Comportamiento a Fatiga de Mezclas Asfálticas Mediante El Ensayo BTM." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53 (9). 2013. Pág, 1689–99. Disponible: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

El módulo resiliente de la mezcla M1 fue el menor con un valor para una temperatura de 20°C de 1786 Mpa, en la M2 el valor fue de 2273 Mpa y la M3 fue de 2380 Mpa. Indicando que la escoria EAF influyo en este resultado debido a su angularidad y adhesión superficial.

En relación a los costos de producción de las mezclas modificadas con EAF y la mezcla convencional, se obtuvo que son más económicas en porcentajes relativamente bajas, sin embargo, se obtuvo que en la mezcla M2 su precio por m<sup>3</sup> fue de 3.82% por debajo del valor del precio de la M1. Y la M3 es de 12.18% por debajo del precio de la M1. Dato que en un trayecto de pavimento en Kilómetros representa un ahorro económico considerable.

El aspecto ambiental se vería muy beneficiado al usar las EAF como remplazo del agregado grueso en las mezclas asfálticas, debido a que se contribuye a minorar el almacenamiento de las escorias, a disminuir el uso de los recursos pétreos e impacto visual que genera la explotación de los mismos.

## **6. RECOMENDACIONES**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la investigación se recomienda continuar con el uso de la escoria EAF en los diseños experimentales de mezclas asfálticas densas en caliente o mezclas densas en frío, considerando la variación del porcentaje de remplazo de la escoria del 100% al 75% del material grueso, toda vez que la mezcla experimentada con el 100% de remplazo de escoria, presentó un valor inadecuado en la prueba de desempeño a la susceptibilidad a la humedad.

Igualmente se recomienda realizar investigaciones que permitan determinar la conveniencia del uso de la escoria EAF en las bases y subbases de los pavimentos. Ya que en el municipio de Tuta y debido a su cercanía y la localización de la empresa Diaco, sus entidades locales han hecho uso de frecuente de la escoria como material para este fin y esta actividad se ha realizado en forma empírica.

## BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA. Producción rocas y materiales de construcción. I Trimestre 2019. Disponible: <https://www.anm.gov.co/?q=content/producci%C3%B3n-nacional-rocas-y-materiales-de-construcci%C3%B3n-i-trimestre-2019>.

ALBERTO, Carlos; RESTREPO CARVAJAL, Juan Fernando; TABORDA OSORIO. El mercado colombiano del acero estructural en el contexto de la globalización. *Revista Ciencias estratégicas* 25 (38). 2017. pág. 339–59. Disponible: <https://doi.org/10.18566/rces.v25n38.a5>.

AMARAL DE LIMA, Luciana. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Universitat. Cataluña. España. 1999.

ASTM International, west conshohocken, p. astm d8-19, standard terminology relating to materials for roads and pavements. 2018. Recuperado de [WWW.astm.org](http://WWW.astm.org).

BASSON, Edwin. *World Steel in Figures 2018*. World Steel Association, 2018. pág. 3–29.

CÁCERES, Carlos A. *Análisis de la metodología Superpave para el diseño de mezclas asfálticas En México*. México. 2007.

CARO-SPINEL, Silvia y ÁLVAREZ-LUGO, Alex Eduardo. Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. *Revista Facultad de Ingeniería*, No. 58. pág. 2011. 95–104.

CARVAJAL VINASCO, Juan Felipe. *Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland*. 2012. pág. 135.

CEDEX, C. de E. y E. de obras P. *Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos*. 2011. pág. 1–34.

CONTRERAS DE VILLAR, Francisco. Validación de escorias de horno de arco eléctrico mediante su uso como adición en hormigón. 2017. pág. 285.

CORREA, Álvaro. Situación actual de la explotación de las canteras en el Distrito Capital. 2000.

DELGADO JOJOA, Miguel G. SÁNCHEZ GILEDE, Jessica A, RONDÓN QUINTANA, FERNÁNDEZ GÓMEZ, Wilmar D.; REYES LIZCANO, Freddy A. Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. *Ingeniería e Investigación* 38 (2). 2018. Pág. 18–26. Disponible: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.68638>.

DELGADO-JOJOA, Miguel G., SÁNCHEZ-GILEDE, Jessica A.; RONDÓN-QUINTANA, Hugo A. FERNÁNDEZ-GÓMEZ, Wilmar D.; REYES-LIZCANO, Freddy A. Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. *Ingeniería e Investigación* 38 (2). 2018. pág. 18–26. Disponible: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2>.

EL TIEMPO, Proceso siderúrgico. publicación 26 de mayo, 2017.

FRÍAS, M., J. T. SAN-JOSÉ, y VEGAS, I. “Árido Siderúrgico en Hormigones: Proceso de Envejecimiento y Su Efecto En Compuestos Potencialmente Expansivos.” *Materiales de Construcción* 60 (297). 2010. pág. 33–46. Disponible: <https://doi.org/10.3989/mc.2019.45007>.

GONZÁLEZ, Martha. Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. 2015. pág. 197.

GONZÁLEZ, Martha. Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. 2015. pág. 197.

HIGUERA, Carlos. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Editorial Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2011.

INVIAS, Instituto Nacional de Vías. Sección 400 - Concreto Hidráulico. Manual de normas de Ensayos de materiales para carretera.2013

INVIAS. 2013. "Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua." Bogotá D.C. 2013

INVIAS. 2013. "Sección 700 y 800 Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos, primera parte."

INVIAS. 2013a. "Artículo 450-13 Mezclas Asfálticas En Caliente de Gradación Continua." Bogotá D.C.

INVIAS. 2019. "Estado de La red vial nacional con criterio técnico para el primer semestre 2019."

INVIAS. Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2012

INVIAS. Estado de la red vial nacional con criterio técnico para el primer semestre 2019.

JAURLARIZAKO, Eusko y otros. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Departamento de ordenación del territorio, vivienda y medio ambiente 112 (483): 211–12. 1996. Disponible: <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>

KHALID, H. A. A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous Materials". Materials and Structures, 33(7), 2002. pág. 457-465.

KIM, Y R, K A SHAH, KHOSLA, N P. Influence of test parameters in SHRP P07 procedure on resilient moduli of asphalt concrete field cores." Transportation Research Record, No. 1353. 1992

LAPARRA, Maurice. The aluminum false twins, Charles Martin Hall and Paul Héroult's first experiments and technological Options. 2012.

LEIVA, VILLACORTA, Fabricio, VARGAS, NORDCBECK. Adriana. Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Infraestructura Vial* 19 (33). 2017. Pág. 35–44.

LOAIZA, Alexandra; GARCIA, Edwin and COLORADO, HENRY A. Evaluation of asphalt binder blended with coconut coir dust and residual coconut fibers for structural applications. *Revista de La Construcción* 17 (3). 2019. pág. 542–54. Disponible: <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.542>.

LOAIZA, Alexandra; GARCIA, Edwin; COLORADO, Henry A. Evaluation of asphalt binder blended with coconut coir dust and residual coconut fibers for structural applications. *Revista de la Construcción* 17 (3). 2019. pág. 542–54. Disponible: <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.542>.

LUXÁN, M. P., R.; SOTOLONGO, F.; DORREGO; HERRERO, E. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace." *Cement and Concrete Research*. 30(4). 2000. pág .517-519.

MANTILLA FORERO, Javier Eduardo, CASTAÑEDA PINZÓN, Eduardo Alberto. Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders1. *DYNA (Colombia)* 86 (208): 2019. pág. 257–63. Disponible: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69400>.

MARDONES PARRA, Luis, Gonzalo; VALDÉS VIDAL, Elsa; SÁNCHEZ, Alonso, CALABI FLOODY, Alejandra. ensayo dinámico axial en probetas cilíndricas entalladas para medir el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo* 37 (1). 2019. pág. 36–56. <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.624.1>.

MARDONES PARRA, Luis, VALDÉS VIDAL, Gonzalo, SÁNCHEZ ALONSO, Elsa, CALABI FLOODY, Alejandra. Ensayo dinámico axial en probetas cilíndricas entalladas para medir el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas. *Ingeniería y Desarrollo* 37 (1): 36–56. pág. Disponible: <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.624.1>.

MASAITIS, John, SCHNEIDER H. *La industria del hierro y el acero*. 2002

MASOUDI, Sajjad; SAYYED Mahdi Abtahi, AHMAD Goli. Evaluation of electric arc

furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials* 135. 2017. pág. 260–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>.

MORENO, Javier. CAPÍTULO 4 El Módulo resiliente.” In, 2005. pág. 28

OLUWASOLA, Ebenezer Akin; MOHD, Rosli Hainin, MANIRUZZAMAN, Md; AZIZ, A. Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings. *Journal of Cleaner Production* 122. 2016. pág. 315–25. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.051>.

ORTIZ G; CASTRO M, Elías X, SANMARTÍN, R. Valorización de escorias procedentes del proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico. *Residuos (Bilbao)* 1996; pág. 66-70.

PALMA, Gabriel Carlos; WAHR, Félix; PÉREZ, y VLADIMIR Estay, Estudio del Comportamiento a Fatiga de Mezclas Asfálticas Mediante El Ensayo BTB.” *Journal of Chemical Information and Modeling* 53 (9). 2013. Pág, 1689–99. Disponible: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

PARRA, Paula. Estado del arte de métodos de gestión de residuos de llantas usadas en Colombia, no. May. 2018.

PASETTO, M.; BALIELLO, A.; GIACOMELLO, G; PASQUINI, E. Sustainable solutions for road pavements: a multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production* 166 (x). 2017. pág. 835–43. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>.

PASETTO, Marco, y BALDO, Nicola. “Recycling of steel slags in road foundations.” *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (6). 2010. pág. 773–77.

PAYNO HERRERA, María Luisa, y MARQUÍNEZ, Jesús Setién. *Metalurgia y Siderurgia 4. siderurgia acero: generalidades propiedades.* Universidad de Cantabria. Departamento de ciencia e ingeniería del terreno y de los materiales. 2013



PENTEADO, Carmen Lucia, SANTOS, Giordano, Beatriz LEÃO Evangelista, Gisleiva Cristina, DOS SANTOS FERREIRA, Pedro Henrique, ANDRADE, BORGES, CECHE LINTZ, Rosa Cristina. Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving Blocks. *Ambiente Construido*. 2019. 19 (2): 21–32. Disponible: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000200305>.

PLAZA, Sara, y RINCÓN Ginna. Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su relación con el desempeño de campo. 2014.

PROCTOR DM; FEHLING, KA; SHAY EC, Wittenborn JL, Green JJ, Avent C, Bigham RD, Connolly M, Lee B, Shepker TO, Zak MA. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science & Technology* 2000; pág. 1576-1582.

RAPOSEIRAS, A, D Movilla, A, VARGAS, R. Bilbao, and CIFUENTES, C. Evaluación de rigidez Marshall, tracción indirecta y módulo resiliente en mezclas asfálticas con RAP y escoria de cobre. *Revista Ingeniería de Construcción* 32 (1). 2017. Pág. 15–24. Disponible: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732017000100002>.

RONDÓN, H. Asfaltos y mezclas asfálticas. Editorial Ecoe, Santafe de Bogotá. 2013.

RONDÓN, Hugo, cita a de SOUSA y otros (1991). Asfaltos y mezclas asfálticas. editorial ECOE, Santafe de Bogotá. 2013.

RONDÓN, Hugo, cita a TAREFDER y otros (2003). Asfaltos y mezclas asfálticas. Editorial académica española. 2013.

RONDÓN, Hugo, REYES, Alberto. Pavimentos Materiales, Construcción y Diseño. Ediciones Eco. Bogotá D.C. 2011.

RUIZ DE ALMODÓVAR, Sel Gabriel. Los Materiales de la tierra. 2013. pág. 146–54.

SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. 2009. Aplicación del Método RAMCODES en el diseño

de mezclas asfálticas de alto desempeño.” RAMCODES de Venezuela, C.A. 1: 20.

SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. 2009. Aplicación del Método RAMCODES en el diseño de mezclas Asfálticas de Alto Desempeño. RAMCODES de Venezuela, C.A. 1: 20.

SÁNCHEZ-LEAL, Freddy J. Aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. RAMCODES de Venezuela, C.A. 2009. pág. 1: 20.

SILVA VERA, Jonathan. Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión, 2012. pág. 136.

SKAF, Marta, MANSO, Juan M.; ARAGÓN, Ángel; FUENTE-ALONSO, José A ORTEGA-LÓPEZ, Vanesa. EAF Slag in Asphalt mixes: a brief review of its possible re-use.” resources, Conservation and Recycling 120. 2017 pág. 176–85. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>.

SKAF, Marta; MANSO, Juan M; ARAGÓN, Ángel; FUENTE ALONSO, José A.; ORTEGA LÓPEZ, Vanesa. EAF slag in asphalt mixes: a brief review of its possible re-use. resources, conservation and recycling 120. 2017. pág. 176–85. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>.

SORLINI, Sabrina; SANZENI, Alex. YRONDI, Luca. y BALDO, Nicola. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag, Padua: Universidad de Padua. Italia; 2010.

UNAMUNZAGA, Lucía. Nuevas aplicaciones industriales de alto valor añadido para escorias negras de acerías. Interempresas. 2018. 46.

VALDÉS, Berenice, and GARNICA, Paul Anguas. 2011. Susceptibilidad a La humedad: de lo básico a lo práctico 1 (1): 12.

VALLET B, Comeau Y, BOUVRETTE J, Parent S. Dephosphatation de l’eau par des scories d’aciérie. Biodôme de Montreal, Canada. 2002

WORLDSTEEL, ASSOCIATION. Steel Industry Co-Products. 2018.