

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO CON
RESIDUOS SIDERÚRGICOS COMO AGREGADOS

RICARDO OCHOA DÍAZ



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA – ESCUELA DE POSGRADOS
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
TUNJA
2019

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO CON
RESIDUOS SIDERÚRGICOS COMO AGREGADOS

RICARDO OCHOA DÍAZ

Tesis Doctoral

Director
PhD. Alfonso López Díaz

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA – ESCUELA DE POSGRADOS
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
TUNJA
2019

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería, reside en ella misma, por lo tanto, no responde de los conceptos expresados en esta Tesis.

Se autoriza su reproducción indicando su origen.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 10 de mayo de 2019

A Dios por darme la oportunidad de cumplir otra meta en mi vida profesional.

A mi esposa Gloria Elizabeth y a mis hijas Laura Alejandra y Mariana, por su compañía, amor y apoyo incondicional en este proyecto.

“Vive como si fueras a morir mañana; aprende como si el mundo fuera a durar para siempre”

Mahatma Gandhi

PREFACIO

Esta tesis fue financiada por: la Gobernación de Boyacá de acuerdo a la convocatoria 733 de 2015, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales – INCITEMA.

El director del trabajo fue el PhD Alfonso López Díaz.

Las siguientes publicaciones (ponencias y artículos) fueron realizados con base en este trabajo:

Ponencias

- Participación en evento científico internacional en calidad de ponente oral. Fourth International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Thechnology (4Th IMRMPT) realizado en Santa Marta del 23 al 26 de mayo de 2017. Organizador: FORISTOM – Foundation of Researches in Science and Technology of Materials. Título: Blast furnace dust and phosphoric slag, new materials for using in road engineering.
- Participación en evento científico internacional en calidad de ponente oral. Fourth International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Thechnology (4Th IMRMPT) realizado en Santa Marta del 23 al 26 de mayo de 2017. Organizador: FORISTOM – Foundation of Researches in Science and Technology of Materials. Título: Use of steel slag as a new materials for roads.
- Participación en evento científico internacional en calidad de ponente oral. Segundo Encuentro Internacional de Investigación Universitaria realizado en Tunja del 5 al 7 de septiembre de 2018. Organizador: Universidad Santo Tomas – Seccional Tunja, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Título: Estudio reológico de cementos asfálticos modificados con polvo de escoria de arco eléctrico EAFD.

Artículos

- Artículo publicado. Título: Blast furnace dust and phosphoric slag, new materials for using in road engineering. R Ochoa Díaz. Referencia: Journal of Physics: Conference Series, Vol. 935 (2017) 012003. doi :10.1088/1742-6596/935/1/012003
- Artículo publicado. Título: use of Steel slag as a new materials for roads. R Ochoa Díaz, M Romero Farfán, J Cárdenas, J Forero. Referencia: Journal of Physics: Conference Series, Vol. 935 (2017) 012006. doi :10.1088/1742-6596/935/1/012006
- Artículo publicado. Título: Análisis del uso de escoria granulada en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentos. Ricardo OCHOA Díaz, Gloria Elizabeth GRIMALDO León, Magda ORJUELA Fajardo, Carlos MUÑOZ León. Referencia: Revista Espacios, Vol. 39 (No. 37) Año 2018, ISSN: 0798-1015

- Artículo publicado. Título: Use of BOF slag and blast furnace dust in asphalt concrete: an alternative for the construction of pavements. Alfonso López-Díaz, Ricardo Ochoa-Díaz, Gloria Elizabeth Grimaldo-León. Referencia: Revista DYNA, Vol. 85, Número 206, pp. 24-30, 2018. doi: <http://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.70404>

- Artículo aceptado para publicación. Título: Electric Arc Furnace Slag and Blast Furnace Dust, Use for the Manufacture of Asphalt Concrete for Roads. Ricardo Ochoa Díaz, Alfonso López Díaz. Referencia: Civil Engineering Infrastructures Journal (CEIJ), Print ISSN: 2322-2093, Online ISSN: 2423-6691. University of Teheran. Iran.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

PhD. Alfonso López Díaz, director de la tesis doctoral, por su aporte y orientación para el logro de los objetivos formulados.

Dra. Alexandra Ossa López, directora del laboratorio de vías terrestres del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, por su apoyo en las actividades realizadas durante la estancia doctoral, así como los aportes realizados para enriquecer la presente tesis.

Dr. Enrique Vera López, Vicerrector de investigación y extensión de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, por su valiosa cooperación y gestión durante el proceso de formación doctoral.

Ing. Manuel Sierra, coordinador del laboratorio de pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, por su apoyo y colaboración en la realización de los ensayos.

A los investigadores del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales – INCITEMA, por los aportes realizados y el apoyo en la realización de los ensayos.

A la Gobernación de Boyacá, por los aportes económicos que permitieron la financiación del proceso de formación doctoral.

A las empresas Acerías Paz del Río S.A. y Diaco Tuta, por aportar los materiales utilizados en esta investigación.

A mi esposa Gloria Grimaldo León, por estar siempre a mi lado, apoyando y motivando para cumplir esta meta.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES	22
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	22
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.2.1 Objetivo general.....	24
1.2.2 Objetivos específicos	24
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.4 METODOLOGÍA.....	25
1.5 DEFINICIONES.....	27
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	30
2.1 INTRODUCCIÓN.....	30
2.2 UTILIZACIÓN DE RESIDUOS EN PAVIMENTOS.....	30
2.2.1 Residuos en concreto asfáltico.....	31
2.2.2 Residuos siderúrgicos en concreto asfáltico.	34
2.3 PROCESO SIDERÚRGICO	38
2.3.1 Proceso siderúrgico integrado.	39
2.3.2 Proceso siderúrgico semi-integrado.....	41
2.4 MATERIALES PARA CONCRETOS ASFÁLTICOS	43
2.4.1 Agregados pétreos.....	43
2.4.2 Ligante asfáltico.....	47
2.5 MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	53
2.5.1 Método de diseño Marshall.....	55
2.5.2 Metodología Superpave.	58
2.5.3 Diseño de mezclas asfálticas protocolo AMAAC.	62
2.5.4 Metodología Ramcodes.	62
2.5.5 Relaciones volumétricas y gravimétricas en mezclas asfálticas..	70
2.6 PRUEBAS DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	75
2.6.1 Susceptibilidad al daño por humedad.	75
2.6.2 Susceptibilidad a la deformación plástica permanente.	77

2.6.3	Módulo resiliente y módulo dinámico.....	80
2.6.4	Fatiga.....	83
3.	ENSAYOS Y RESULTADOS	88
3.1	INTRODUCCIÓN.....	88
3.2	DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES	88
3.3	PRESENTACIÓN DE ETAPAS.....	90
3.4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	92
3.5	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	95
3.5.1	Procedencia y características visuales de los materiales.....	95
3.5.2	Granulometría.....	98
3.5.3	Resultados de los ensayos de caracterización.....	98
3.6	DISEÑO DE LAS MEZCLAS	109
3.6.1	Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico.....	112
3.6.2	Obtención de la fórmula de trabajo.....	114
3.6.3	Verificación de las propiedades de desempeño.....	125
3.7	ESTUDIO REOLÓGICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLVO DE ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAFD.....	140
3.7.1	Preparación del asfalto modificado con EAFD.....	141
3.7.2	Pruebas de propiedades físicas.....	141
3.7.3	Pruebas de reómetro de corte dinámico DSR.....	142
3.7.4	Ensayo de recuperación elástica a diferentes esfuerzos MSCR.....	146
4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	150
4.1	INTRODUCCIÓN.....	150
4.2	ANÁLISIS TÉCNICO.....	150
4.2.1	Contenido óptimo de cemento asfáltico.....	150
4.2.2	Estabilidad Marshall.....	151
4.2.3	Flujo.....	153
4.2.4	Vacíos con aire.....	154
4.2.5	Vacíos en el agregado mineral VAM.....	155
4.2.6	Vacíos llenos de asfalto.....	156
4.2.7	Relación estabilidad/flujo.....	157
4.2.8	Relación llenante/ligante efectivo.....	157

4.2.9	Susceptibilidad a la humedad.	159
4.2.10	Susceptibilidad a la deformación permanente.	160
4.2.11	Módulo resiliente.	162
4.2.12	Leyes de Fatiga.	164
4.2.13	Influencia de BFD en el comportamiento mecánico a través del tiempo.	166
4.2.14	Comportamiento del cemento asfáltico modificado con EAFD	169
4.3	ANÁLISIS ECONÓMICO.	169
4.4	ANÁLISIS AMBIENTAL.	171
5.	CONCLUSIONES	174
5.1	INTRODUCCIÓN	174
5.2	SOBRE LAS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	174
5.2.1	¿Qué propiedades físicas y químicas tienen los residuos sólidos de la producción de acero?.....	175
5.2.2	De acuerdo a esas propiedades y a la comparación con materiales granulares normalmente utilizados en capas estructurales para pavimentos ¿qué tipo de sustitución podría llevarse a cabo?	176
5.2.3	¿Qué cambios en el impacto ambiental se podrían generar con la utilización de estos residuos y la sustitución de agregados naturales?	176
5.3	METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS....	177
5.4	DISEÑO EN LABORATORIO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CON LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS	177
5.4.1	Concretos asfálticos con BOF y BFD.	178
5.4.2	Concretos asfálticos con EAF y BFD.	180
5.4.3	Concretos asfálticos con escoria EAF, escoria BOF y BFD.....	182
5.4.4	Concretos asfálticos con escoria EAF.	184
5.4.5	Concretos asfálticos con BFD.....	185
5.5	ESTUDIO REOLÓGICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON EAFD.....	188
5.6	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA FABRICACIÓN DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CON RESIDUOS SIDERÚRGICOS	188
5.7	ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE LOS CONCRETOS ASFÁLTICOS CON RESIDUOS SIDERÚRGICOS.....	190
5.8	CONCLUSIONES FINALES	190
	BIBLIOGRAFÍA	192

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente	44
Tabla 2. Granulometría Superpave.	45
Tabla 3. Requisitos mínimos del cemento asfáltico.	48
Tabla 4. Requisitos mínimos para cementos asfálticos, clasificados por su viscosidad	48
Tabla 5. Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG	50
Tabla 6. Niveles de diseño de la metodología Superpave.	59
Tabla 7. Requerimientos de compactación Superpave	60
Tabla 8. Niveles de diseño protocolo AMAAC.	62
Tabla 9. Variables independientes	89
Tabla 10. Variables dependientes	90
Tabla 11. Resultados caracterización físico-mecánica agregados gruesos	99
Tabla 12. Resultados caracterización físico-mecánica agregados finos	99
Tabla 13. Gravedad específica de la llenante mineral	100
Tabla 14. Resultados caracterización cemento asfáltico AC 60-70	101
Tabla 15. Viscosidad Brookfield del cemento asfáltico	101
Tabla 16. Composición química de los materiales por fluorescencia de rayos X	104
Tabla 17. Comparativo de composición química de EAF y BOF, con otros autores	105
Tabla 18. Comparativo de composición química de BFD, con otros autores	105
Tabla 19. Compuestos mayoritarios identificados con XRD en los agregados gruesos	108
Tabla 20. Compuestos mayoritarios identificados con XRD en los agregados finos	108
Tabla 21. Requerimientos mezclas asfálticas	110
Tabla 22. Requerimientos de compactación Superpave.	111
Tabla 23. Gravedades específicas de la combinación de agregado.	112
Tabla 24. Valores de G_{mm} y G_{se} para diseño.	113
Tabla 25. Verificación de desigualdad gravedades específicas	113
Tabla 26. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-2 y M-3	117
Tabla 27. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-4 y M-5	119
Tabla 28. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-6 y M-7	121
Tabla 29. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-8 y M-9	122

Tabla 30. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-10 y M-11	124
Tabla 31. Resultados ensayo de tracción indirecta	126
Tabla 32. Velocidades de deformación	129
Tabla 33. Resultados módulo resiliente.	131
Tabla 34. Módulos resilientes a 20 °C	131
Tabla 35. Resultados ensayo de fatiga	136
Tabla 36. Propiedades físicas y pérdida de masa del cemento asfáltico	142
Tabla 37. Resultados de la prueba reológica de corte dinámico en asfaltos iniciales	143
Tabla 38. Resultados de la prueba reológica de corte dinámico en asfaltos RTFO	144
Tabla 39. Resultados de la prueba reológica de corte dinámico en asfaltos RTFO+PAV	145
Tabla 40. Valores de R y J_{nr} de los cementos asfálticos	149
Tabla 41. Especificaciones AASHTO para el ensayo MSCR	149
Tabla 42. Distancia de acarreo y precio de adquisición de materiales	169
Tabla 43. Precio unitario de cada mezcla por m ³	170
Tabla 44. Resultado de espesores de diseño	171
Tabla 45. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de escoria BOF y BFD utilizado	178
Tabla 46. Tendencias de las propiedades respecto al aumento escoria EAF y BFD utilizado	180
Tabla 47. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de escoria BOF, escoria EAF y BFD utilizado	182
Tabla 48. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de escoria EAF utilizado	184
Tabla 49. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de residuo utilizado	186

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Costo de materiales y actividades en el reciclado de mezclas asfálticas en caliente	34
Figura 2. Flujo general del proceso siderúrgico integrado.	39
Figura 3. Esquema del proceso productivo de un alto horno	40
Figura 4. Descargue de arrabio en el convertidor	41
Figura 5. Producto terminado de laminación	41
Figura 6. Flujo general del proceso siderúrgico semi-integrado.	42
Figura 7. Horno de arco eléctrico.	42
Figura 8. Tipos de mezclas asfálticas según la granulometría.	44
Figura 9. Granulometría Superpave para tamaño máximo nominal 19.0 mm	46
Figura 10. Análisis mecánico del ensayo Reómetro de corte dinámico (DSR)	52
Figura 11. Principio del reómetro de viga a flexión BBR	53
Figura 12. Configuración del ensayo de tracción directa DDT	54
Figura 13. Gráficas de diseño según metodología Marshall.	57
Figura 14. Resumen para determinar el óptimo de asfalto.	58
Figura 15. Representación punto-ámbito para una granulometría	65
Figura 16. Representación franja granulométrica en especificación punto-ámbito	65
Figura 17. Forma general de una carta de gradación	66
Figura 18. Datos e isolíneas para las especificaciones de vacíos de aire	67
Figura 19. Datos e isolíneas para especificaciones de vacíos en agregado mineral	68
Figura 20. Datos e isolíneas para especificaciones de vacíos llenos de asfalto	68
Figura 21. Representación de isolíneas superpuestas, polígono de vacíos	68
Figura 22. Centroide del polígono de vacíos	69
Figura 23. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.	71
Figura 24. Esquema de gravedad específica bulk	71
Figura 25. Esquema de gravedad específica aparente.	72
Figura 26. Esquema de la gravedad específica efectiva	73
Figura 27. Esquema de vacíos con aire en la mezcla compactada.	73
Figura 28. Esquema de asfalto absorbido y asfalto efectivo.	74
Figura 29. Escenario antes y después de inducir una mezcla a la humedad	76

Figura 30. Curva de comportamiento típica en que se presenta la deformación permanente acumulada.	78
Figura 31. Pulsos de carga aplicada a los ensayos módulo resiliente y módulo dinámico	81
Figura 32. Módulo (complejo) dinámico	83
Figura 33. Ejemplo típico de RDEC	85
Figura 34. Energía disipada versus ciclos de carga	86
Figura 35. Ensayos de caracterización de los materiales	91
Figura 36. Ensayos de caracterización de las mezclas asfálticas	92
Figura 37. Metodología	93
Figura 38. Dosificación mezclas	94
Figura 39. Ubicación cantera La Roca	95
Figura 40. Ubicación Acerías Paz del Río S.A.	96
Figura 41. Ubicación Gerdau-Diaco	96
Figura 42. Ubicación IncoAsfaltos S.A.	97
Figura 43. Característica visual de los materiales (a) Grava, (b) escoria EAF, (c) escoria BOF, (d) Arena, (e) BFD	97
Figura 44. Granulometría de los materiales	98
Figura 45. Curva reológica cemento asfáltico AC 60-70	102
Figura 46. Micrografías SEM de los agregados finos a un aumento de 1.00 KX de (a) arena; (b) BFD.	103
Figura 47. Micrografías SEM de los agregados gruesos a un aumento de 1.00 KX de (a) grava; (b) escoria EAF; (c) escoria BOF	104
Figura 48. Difractogramas para (a) escoria BOF, (b) escoria EAF, (c) grava	106
Figura 49. Difractogramas para (a) BFD, (b) arena	107
Figura 50. Granulometría de trabajo MDC-19	109
Figura 51. Compactador giratorio y molde de compactación.	110
Figura 52. Curva de compactación de la mezcla de control (M-1)	111
Figura 53. Ensayo Rice para determinar la gravedad específica máxima teórica, G_{mm}	113
Figura 54. Ensayo gravedad específica bulk de probetas compactadas.	114
Figura 55. Ensayo Estabilidad y flujo Marshall.	115
Figura 56. Polígono de vacíos para la mezcla M-1	115

Figura 57. Polígono de vacíos para la mezcla M-2	116
Figura 58. Polígono de vacíos para la mezcla M-3	117
Figura 59. Polígono de vacíos para la mezcla M-4	118
Figura 60. Polígono de vacíos para la mezcla M-5	119
Figura 61. Polígono de vacíos para la mezcla M-6	120
Figura 62. Polígono de vacíos para la mezcla M-7	121
Figura 63. Polígono de vacíos para la mezcla M-8	122
Figura 64. Polígono de vacíos para la mezcla M-9	122
Figura 65. Polígono de vacíos para mezcla M-10	123
Figura 66. Polígono de vacíos mezcla M-11	124
Figura 67. Curva de compactación en función del %G _{mm} de la mezcla M-1	125
Figura 68. Ensayo de tracción indirecta.	126
Figura 69. Ensayo de resistencia a la deformación plástica permanente.	128
Figura 70. Curva de deformación de las mezclas	129
Figura 71. Equipo NAT para la determinación módulo resiliente	130
Figura 72. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-2 y M-3	132
Figura 73. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-4 y M-5	132
Figura 74. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-6 y M-7	133
Figura 75. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-8 y M-9	133
Figura 76. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-10 y M-11	134
Figura 77. Ensayo para determinar leyes de fatiga	134
Figura 78. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-2 y M-3	137
Figura 79. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-4 y M-5	138
Figura 80. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-6 y M-7	139
Figura 81. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-8 y M-9	139
Figura 82. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-10 y M-11	140
Figura 83. Reómetro de corte dinámico DSR	143
Figura 84. Asfaltos iniciales (G*/senδ)	144
Figura 85. Asfaltos envejecidos RTFO (G*/senδ)	145
Figura 86. Asfaltos envejecidos RTFO+PAV (G* senδ)	146
Figura 87. Representación gráfica de un ciclo en el ensayo MSCR	147
Figura 88. Representación del cálculo de parámetro J _{nr}	147

Figura 89. Resultados de deformaciones acumuladas bajo esfuerzo de 0.1 kPa.	148
Figura 90. Resultados de deformaciones acumuladas bajo esfuerzo de 3.2 kPa.	148
Figura 91. Comparación del contenido óptimo de cemento asfáltico	150
Figura 92. Comparación de los resultados de estabilidad.	152
Figura 93. Comparación de los resultados de flujo	154
Figura 94. Comparación de vacíos con aire	155
Figura 95. Comparación de vacíos en el agregado mineral	156
Figura 96. Comparación de vacíos llenos de asfalto	157
Figura 97. Comparación de relación estabilidad/flujo	158
Figura 98. Comparación de relación llenante/ligante efectivo	158
Figura 99. Resultados ensayo de resistencia a la tracción indirecta	159
Figura 100. Deformación total al final del ensayo	161
Figura 101. Velocidad de deformación en el intervalo 105 a 120 minutos	162
Figura 102. Módulos resilientes de las mezclas a 20°C	163
Figura 103. Deformaciones iniciales	164
Figura 104. Vida a fatiga a diferentes deformaciones mezcla M-1, M-2, M-3, M-4, M-5 y M-6.	165
Figura 105. Vida a fatiga a diferentes deformaciones mezcla M-1, M-7, M-8, M-9, M-10 y M-11.	166
Figura 106. Influencia de BFD en la estabilidad y flujo a través del tiempo	167
Figura 107. Precio adquisición concretos asfálticos en planta (Millones de pesos)	171
Figura 108. Reducción de explotación de materiales granulares naturales.	173

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

RESUMEN

El auge de la construcción de grandes obras de ingeniería ha impulsado la demanda del acero, lo que ha generado un incremento en la producción de residuos siderúrgicos, situación que causa problemas ambientales debido a su acumulación y no disposición adecuada. Igualmente, la explotación de recursos naturales no renovables como los agregados pétreos están generando deterioro en el medio ambiente; si a esto le sumamos que las regulaciones ambientales para la explotación de estos materiales no renovables son cada vez más estrictas generando incremento significativo en los costos de producción. En consecuencia, esto lleva a un cambio de paradigma: utilizar materiales no convencionales y emplear técnicas de reciclajes de los pavimentos existentes.

El uso de residuos industriales en diferentes procesos debe estar enfocado hacia el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. Durante el proceso de la fabricación de acero se producen diferentes residuos entre los cuales se encuentran la escoria de horno al oxígeno (BOF), escoria de horno de arco eléctrico (EAF) y polvo de alto horno (BFD).

Esta investigación analiza la conveniencia técnica del uso de la escoria BOF y escoria EAF como agregado grueso y estudia la alternativa del uso de BFD como agregado fino, para fabricar mezclas asfálticas en caliente para pavimentos, como una alternativa para mitigar los problemas ambientales derivados de la acumulación de residuos siderúrgicos y de la explotación de materiales no renovables, como la grava y la arena. Para lograr el objetivo, se analizaron once tipos de mezclas asfálticas, una mezcla con materiales convencionales y diez mezclas sustituyendo parcial (50%) y totalmente (100%) el agregado grueso por escoria BOF y escoria EAF y el agregado fino por BFD. El diseño de las mezclas se realizó con la metodología Ramcodes, la cual se basa en el principio del polígono de vacíos. Mediante ensayos se evaluaron las características del diseño preliminar y verificaron las propiedades de desempeño de cada una de las mezclas.

También se estudia y analiza la posibilidad de modificar el cemento asfáltico con polvo de escoria de horno de arco eléctrico (EAFD), Para lo cual se realiza el estudio reológico añadiendo 3%, 6% y 10% de EAFD y se compara con los resultados del cemento asfáltico base. Se realizan los ensayos con el reómetro de corte dinámico DSR para determinar los parámetros G^* y δ en los cementos asfáltico originales, envejecidos en el horno rotatorio de película delgada (RTFO) y en el horno de envejecimiento a presión (PAV). También se realiza el ensayo de recuperación elástica a diferentes esfuerzos MSCR, el cual mide las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico envejecido a corto plazo en RTFO.

Los resultados de este estudio confirman el uso de escoria BOF y escoria EAF como agregado grueso e indican la factibilidad del uso de BFD como agregado fino, para reemplazar parcialmente los agregados convencionales, en la fabricación de concretos asfálticos para uso en carreteras. Respecto a las propiedades mecánicas, las mezclas cumplen con los requerimientos del INVIAS para un nivel de tránsito NT-3, como son estabilidad, flujo y propiedades volumétricas. Asimismo, las propiedades de desempeño (susceptibilidad a la humedad, susceptibilidad a la deformación permanente, módulo resiliente y fatiga) presentaron un buen comportamiento.

INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de la fabricación de acero se producen diferentes residuos entre los cuales se encuentran las escorias (Parish et al., 2014), (Lobato et al., 2015), (Omran & Fabritius, 2017). Las más conocidas son la escoria de alto horno (BFS), escoria de horno al oxígeno (BOF) y escoria de horno eléctrico (EAF) (Kambole et al., 2017). Otro residuo que se produce durante la fabricación del acero es el polvo de alto horno (BFD) (Gupta et al., 2005).

La escoria EAF es producida durante el proceso de la fabricación de acero a partir de chatarra en el horno eléctrico en las siderúrgicas semi-integradas (Masoudi et al., 2017). La escoria BOF es producida durante el proceso de transformación del arrabio, proveniente del alto horno, en acero; el arrabio reacciona con cal, silicatos, óxidos de aluminio, óxidos de manganeso y ferritas dependiendo de la calidad de acero que se produzca (Xie et al., 2017). El polvo BFD se produce durante el proceso de transformación del mineral de hierro en arrabio, en el cual dicho material, el coque y la caliza se funden a una temperatura de aproximadamente 1500 °C, durante este proceso se generan gases y material fino particulado el cual es recuperado en los colectores (T. Hu et al., 2017).

Se han realizado investigaciones alrededor del mundo en las cuales se ha concluido que es factible la utilización de las escorias en la fabricación de mezclas asfálticas (Skaf et al., 2017). Sin embargo, en Colombia hasta ahora se está investigando al respecto, así como en la utilización de polvo BFD como agregado fino en reemplazo del agregado natural (arena).

En Colombia la única siderúrgica integrada es Acerías Paz del Río S.A., ubicada en el Departamento de Boyacá, en donde la producción de polvo BFD es de aproximadamente 7200 toneladas por año y de escoria BOF es de 72000 toneladas por año (González, 2018). La escoria EAF es producida por la siderúrgica Gerdau-Diaco, también en el Departamento de Boyacá, cuya producción es de 60000 toneladas por año aproximadamente (Acosta, 2018). Debido a la poca utilización de estos residuos y a la mala disposición generan un problema para el medio ambiente. Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de buscar un uso alternativo a estos residuos siderúrgicos. Además, la construcción y mantenimiento de carreteras incrementa el uso de agregados naturales no renovables, como piedra caliza y arena, causando otro impacto negativo al medio ambiente con su explotación.

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad de reemplazar parcial o totalmente los agregados naturales (arena y grava) por escorias EAF y BOF como agregado grueso y BFD como agregado fino, respectivamente, en concretos asfálticos, cumpliendo con los requisitos técnicos y ambientales.

De acuerdo con lo anterior, la investigación incluye tres etapas. En primer lugar, es necesario conocer las características físicas y químicas de los materiales a emplear. Las escorias EAF y BOF, el BFD y los agregados naturales se caracterizarán por fluorescencia de rayos X (XRF), en el microscopio electrónico de barrido (SEM) y por Difracción de

rayos X (DRX) para obtener los elementos químicos presentes y la microtopografía. La caracterización física y mecánica se realizara de acuerdo con las normas ASTM (ASTM, 2005a), (ASTM, 2005b) e INVIAS (INVIAS, 2013f) teniendo en cuenta los ensayos para agregados pétreos a utilizar en mezclas asfálticas. En segundo lugar, se diseñarán y fabricarán once (11) tipos de mezclas con la metodología Ramcodes (Sánchez et al., 2002): Una mezcla de control preparada con agregados naturales (grava y arena) y diez mezclas en las cuales se reemplazaran parcial y totalmente los agregados naturales por los residuos utilizados en esta investigación. Se realizarán ensayos de verificación de vacíos y análisis de estabilidad y flujo para verificar el cumplimiento de las especificaciones (INVIAS, 2013b). Luego se efectuarán las pruebas de desempeño de las mezclas asfálticas como susceptibilidad a la humedad, resistencia a la deformación permanente, determinación del módulo resiliente y leyes de fatiga. Por último, los resultados se analizarán y se utilizarán para determinar la viabilidad del uso de estos residuos en la fabricación de concreto asfáltico para su uso en la construcción de carreteras.

El documento se organiza de la siguiente manera: primero, se presentan unas generalidades en las cuales se expone el problema de investigación, los objetivos y la justificación de la investigación; además, se explica la metodología a seguir y se presentan definiciones de términos importantes para el mejor entendimiento del trabajo. Segundo, se da a conocer la revisión de la literatura en relación con la utilización de residuos industriales en la fabricación de concreto asfáltico y lo relacionado con la utilización de residuos de la industria siderúrgica en concretos asfálticos para pavimentos; además, se ilustra sobre el proceso siderúrgico para entender en donde se producen los materiales utilizados en esta investigación y se anuncia lo relacionado con la caracterización de materiales, las diferentes metodologías y parámetros necesarios para el diseño de mezclas asfálticas y se profundiza en la metodología Ramcodes la cual es utilizada en esta investigación. Tercero, se presenta la metodología utilizada para alcanzar los objetivos trazados y los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados. También se presenta el análisis y resultados del estudio reológico realizado al cemento asfáltico modificado con polvo de escoria de horno de arco eléctrico (EAFD). Luego, se presenta el análisis y evaluación de los resultados, en el cual se realiza un análisis técnico el cual se basa en la comparación de los resultados obtenidos de las mezclas modificadas en relación con la mezcla base; además, se presenta una evaluación económica para cada una de las mezclas y se expresan las ventajas ambientales con la posible utilización de estos residuos siderúrgicos.

1. GENERALIDADES

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La infraestructura en el país no ha evolucionado paralelamente con su desarrollo. La construcción a nivel mundial, por ejemplo, se ha encontrado ante varios retos en especial a lo concerniente a la escasez de recursos energéticos fósiles como el petróleo (Hirsch, 2008), (Capellán-Pérez et al., 2016), al igual que el aumento en la demanda de materiales no renovables como grava, arena y piedras que son utilizados en la construcción de obras de ingeniería (Mariño, 2016). Además, en lo concerniente a materiales para pavimento, el costo de las mezclas asfálticas ha contribuido al atraso existente especialmente en las vías secundarias y terciarias. En los últimos años, se ha pretendido desarrollar técnicas basadas en la reutilización de residuos como sustitutos de algunos agregados pétreos en los pavimentos. El empleo de estos residuos, supone, no solo la disminución de los depósitos, sino también la reducción del impacto generado por la explotación de canteras. La generación de residuos en la industria, en este caso la siderúrgica, está provocando problemas en su manejo y almacenamiento, dado que tienen poca o ninguna utilización (Gómez, 2000), (Ding et al., 2018), por lo que es pertinente estudiar la posible utilización de algunos residuos siderúrgicos en la construcción de estructuras de pavimento. Con esto, se pretende mitigar el problema ambiental generado por el almacenamiento de residuos como, escoria de arco eléctrico (EAF), escoria de horno al oxígeno (BOF) y polvo de alto horno (BFD) en patios; así como reducir la explotación de materiales no renovables como la grava y arena.

La industria siderúrgica alcanzó su auge cuando se logró una gran producción de hierro con el desarrollo del alto horno (Chao Li et al., 2017), (Adams & Mueller, 1982). El proceso del alto horno es de óxido-reducción en el cual se carga mineral de hierro, caliza, coque y sinter por la parte alta; por las toberas, que se encuentran en la parte baja, se inyecta aire u oxígeno precalentado a 700 °C, la carga que desciende se va calentando por contacto con el aire caliente, se realizan las reacciones químicas; el material llega a estado líquido a temperaturas cercanas a 2200 °C. Los productos obtenidos directamente son arrabio y escoria. Durante el proceso se genera gas el cual arrastra partículas finas, estas son decantadas en el colector y es lo que se conoce como polvo de alto horno (BFD) (Pastas, 2017).

El arrabio, producto del alto horno, sigue su proceso en la acería para su transformación en acero. Este se vierte en los mezcladores, en donde se le adicionan compuestos químicos como el ferromanganeso, ferrosilicio o coquecillo, lo que le dará unas especificaciones técnicas determinadas al acero según se requiera. Se le inyecta oxígeno para disminuir el contenido de silicio y se pasa al mezclador donde se almacena y homogeniza química y térmicamente. Posteriormente, se carga al convertidor junto con la cal en roca y chatarra, y mediante la inyección de oxígeno con cal se produce la oxidación de los elementos que se consideran impurezas formando el acero y escoria (BOF) (Farigua, 2017).

El segundo método de fabricación de acero es el proceso de horno de arco eléctrico, los cuales funcionan a partir de chatarra. Esta se carga al horno donde se somete a un proceso de fusión con una posterior inyección de oxígeno, coque y productos químicos que

permiten la separación de elementos nocivos para el acero. De este proceso también se produce una escoria que se conoce como escoria de horno de arco eléctrico (EAF) (Eugene Avallone et al., 2006).

Actualmente, en la industria siderúrgica del país, se están presentando problemas en el almacenamiento de escorias EAF, BOF y polvo BFD, razón por lo que se hace evidente la necesidad de buscar otras alternativas para su utilización, como es el caso en la fabricación de concretos asfálticos. Con la presente investigación se pretende estudiar y analizar las propiedades de las mezclas asfálticas elaboradas con sustitución parcial o total de los agregados naturales por residuos de la industria siderúrgica. Aunque a nivel mundial se han realizado investigaciones al respecto, a nivel nacional este tema no se ha abarcado con mucha intensidad.

Adicionalmente, el actual costo de las mezclas asfálticas ha limitado el desarrollo de la infraestructura vial del país, especialmente en lo que respecta a vías de segundo orden. Actualmente, se estima que el sistema nacional de carreteras tiene una longitud de 215.988 Km, de los cuales 17.382 Km (8%) hace parte de la red de primer orden, a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). La red vial de segundo orden es de 44.399 Km (21%) y la de tercer orden cuenta con 154.207 Km (71%) (Ovalle, 2016). Teniendo en cuenta las debilidades en la gestión de la malla secundaria, el Gobierno Nacional adelantó el Plan Vial Regional (PVR), con el objeto de apoyar a los departamentos. Según el inventario realizado por el PVR, de la red vial secundaria, el 42.8% corresponden a vías en afirmado; 24% a vías pavimentadas y 28% a vías destapadas (en tierra). Solo el 31% de las vías pavimentadas están en buen estado. De las vías terciarias solo cerca de 1400 Km están pavimentados.

Es necesario encontrar opciones de materiales con menores costos comparados con los convencionales, para ser utilizados en la pavimentación de las carreteras secundarias y terciarias. La situación anterior, evidencia la necesidad de identificar soluciones alternativas en el uso de materiales, que a su vez redunden en bajos costos de las materias primas y en la construcción de carreteras. Las soluciones no surgirán de manera fácil y oportuna, por tanto, es imperioso instaurar una política que conduzca al empleo óptimo de los residuos.

Por lo anterior, se pueden plantear algunas preguntas que ayuden a interpretar los alcances y desarrollo de la investigación: ¿qué propiedades físicas y químicas tienen los residuos sólidos de la producción de acero?, de acuerdo a esas propiedades y a la comparación con materiales granulares normalmente utilizados en capas estructurales para pavimentos ¿qué tipo de sustitución podría llevarse a cabo? y ¿qué cambios en el impacto ambiental se podrían generar con la utilización de estos residuos y la sustitución de agregados naturales?

A nivel internacional se ha investigado al respecto; en este contexto se plantea esta investigación con la novedad de incluir una metodología para determinar el contenido óptimo de asfalto como lo es la Ramcodes. Lo anterior teniendo en cuenta investigaciones en las cuales se ha concluido que los resultados con la metodología Ramcodes se ajustan a los obtenidos con metodologías más conocidas como la metodología Marshall (Ochoa Díaz, 2012), (Ochoa-Díaz, 2013). Con esto, se aportarían más evidencias al estado del

arte respecto a la pertinencia de utilizar metodologías alternas que generan resultados aceptables a un menor costo y menor tiempo de ejecución de los ensayos de laboratorio. Otras novedades en esta investigación son la utilización de polvo de alto horno (BFD) como nuevo material fino en mezclas asfálticas y la mezcla de dos tipos de escoria como agregado grueso.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un análisis y trabajo experimental a nivel de laboratorio para evaluar la sustitución parcial o total de los agregados convencionales por escoria de horno de arco eléctrico, escoria de horno al oxígeno y polvo de alto horno en la fabricación de mezclas asfálticas y evaluar su comportamiento para su empleo en la construcción de carreteras.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados y la composición química de las escorias y el polvo de alto horno.

Establecer la sustitución parcial y total de los materiales convencionales por residuos siderúrgicos en la mezcla asfáltica.

Validar la sustitución de residuos mediante la implementación de la metodología Ramcodes en el diseño de las mezclas asfálticas.

Analizar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas con residuos siderúrgicos.

Establecer una comparación técnica y económica de la mezcla asfáltica con materiales convencionales y las mezclas asfálticas con incorporación de residuos de la industria siderúrgica.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Desde los tiempos más remotos, el hombre se ha esforzado por desarrollar actividades que le han permitido subsistir y evolucionar. En un principio, dichas actividades se limitaban a consumir directamente los recursos que el medio ofrecía, sin producir alteración alguna en la naturaleza ya que los residuos generados eran básicamente orgánicos. Posteriormente, con el perfeccionamiento de las actividades como la industria se ha incrementado la aparición de residuos inorgánicos que por su naturaleza el medio ambiente es incapaz de absorber y degradar de manera eficiente.

Con la llegada de la revolución industrial a finales del siglo XVIII y principios del XIX, los problemas de los residuos se multiplicaron, debido principalmente al importante incremento de la población y a la diversificación de las actividades realizadas, aparecen

nuevas industrias y con ellas nuevos residuos (Chaves Palacios, 2004). Este hecho trajo consigo la necesidad de establecer mejoras en la gestión de residuos y el empleo de nuevas tecnologías para optimizar su tratamiento o empleo en usos alternativos.

Como parte del proceso de la fabricación de acero en siderúrgicas integradas se producen residuos como escorias, lodos, polvillo, alquitrán y otros que en algunos casos no tienen mayor uso, convirtiéndose en desechos contaminantes (Iluțiu-Varvara et al., 2017). Este proyecto de investigación pretende contribuir al desarrollo en la utilización de residuos de la industria siderúrgica para mejorar las condiciones ambientales en las zonas de influencia de estas empresas. Primero con la disminución del almacenamiento de residuos que causan una afectación en el entorno y segundo al contribuir en el mejoramiento de la calidad de vida de los municipios o ciudades que están dentro del área de influencia, mediante el empleo de residuos siderúrgicos en la fabricación de mezclas para pavimentación de vías rurales y urbanas de estas localidades; además de contribuir en la disminución del impacto ambiental causado por la explotación de agregados naturales como gravas y arenas.

Los pavimentos tienen una clara función socioeconómica, aunque para el común de las personas, pasan desapercibidos, quizás porque se construyen directamente sobre el suelo y no tienen el atractivo de las estructuras verticales, la espectacularidad de los puentes o de las centrales eléctricas; o simplemente porque el transitar de un sitio a otro es algo tan rutinario que se ha perdido la conciencia de la existencia de las estructuras de pavimentos. Sin embargo, no cabe la menor duda de que su importancia es igual a la de los ejemplos mencionados.

En la actualidad es fundamental encontrar opciones de materiales con menores costos que los convencionales para ser utilizados en la pavimentación de las carreteras, en vías secundarias y terciarias de tal manera que se contribuya con la conectividad y la disminución del costo de transporte e incremento en el desarrollo y bienestar de las comunidades con mayores necesidades.

De encontrar los resultados esperados esta investigación sería pertinente la contribución ambiental en cuanto a la utilización de residuos siderúrgicos, disminuir notablemente su acumulación y disminuir la explotación de materiales no renovables en canteras o lechos de ríos. En cuanto a la pertinencia técnica, encontrando mezclas con mejor comportamiento y menor costo.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología empleada en la investigación se constituyó de varias etapas ordenadas y programadas, donde cada una de ellas tiene sus procedimientos y tareas a realizar.

La primera etapa consistió en una revisión bibliográfica detallada y actualizada, que estableció las bases conceptuales de todo el proceso siderúrgico, proceso investigativo, metodologías de diseño para obtener la fórmula de trabajo, parámetros y comportamiento de mezclas asfálticas, ensayos a realizar tanto a los materiales como a las mezclas y resultados de investigaciones sobre el tema.

Seguidamente, se realizó el muestreo de los residuos a utilizar. Las muestras de escoria BOF y BFD fueron tomadas de los patios de almacenamiento de la empresa Acerías Paz del Río S.A., en Belencito (Boyacá), los cuales se tomaron de distintos sitios dentro del lote. Por su parte, la escoria EAF fue tomada de los patios de almacenamiento de la empresa Gerdau Diaco, en Tuta (Boyacá).

La tercera etapa fue la realización de la caracterización física de los residuos y agregados naturales. Esta etapa comprendió la realización de ensayos como: granulometría, desgaste en la máquina de los ángeles, desgaste por abrasión en el equipo micro-deval, índice de plasticidad, equivalente de arena, gravedad específica; estos resultados se compararon con las especificaciones generales de construcción de carreteras y se definió el cumplimiento o rechazo para la utilización en concretos asfálticos. Al material no convencional (escorias EAF y BOF y polvo BFD) se le realizaron tres ensayos durante su caracterización, realizando un muestreo aleatorio del material recibido de las empresas, en procura de obtener resultados confiables en la caracterización.

En la cuarta etapa se realizó una caracterización química de las escorias EAF y BOF y al BFD, así como a los materiales convencionales. Esta comprendió la realización de ensayos como: caracterización composicional con el equipo fluorescencia de rayos X, toma de microtopografía con el microscopio electrónico de barrido y determinación de la estructura cristalográfica en el difractómetro de rayos X. Lo anterior para identificar los compuestos predominantes, forma, textura y porosidad de la muestra y establecer la conveniencia de la utilización sin generar ningún riesgo. Esta caracterización también se realizó a los agregados naturales para establecer una comparación con los residuos.

Una vez conocidos los resultados de laboratorio, se analizaron las propiedades de los residuos y de acuerdo a las dosificaciones propuestas se procedió al diseño de las diferentes mezclas con las diferentes combinaciones de materiales para llevar a cabo la investigación.

Se diseñó una mezcla con únicamente agregados naturales, la cual fue la mezcla de control para comparar los resultados de las mezclas con los residuos. Teniendo el diseño de las diferentes combinaciones de material se continuó con el diseño en laboratorio de las mezclas asfálticas utilizando los residuos de la industria siderúrgica. Este diseño se realizó con la implementación de la metodología Ramcodes, teniendo en cuenta los pasos y recomendaciones de este método; este procedimiento se realizó con las combinaciones de material diseñadas. Se utilizó dicha metodología teniendo en cuenta que es una metodología nueva en Colombia, además ofrece ventajas técnicas, económicas y los resultados son similares a los obtenidos con metodologías más conocidas.

Después se analizaron los resultados obtenidos por el método Ramcodes para cada una de las mezclas realizadas y se determinó su comportamiento. De este modo, se determinó la mezcla que ofrece mejores características y comportamiento, así como el contenido óptimo de asfalto.

En las mezclas preparadas con solo BFD como sustituto del agregado fino y teniendo en cuenta que es el material nuevo a implementar en esta investigación, se determinó su influencia en el comportamiento de la mezcla a través del tiempo. Para lo anterior se

fabricaron varias muestras con la fórmula de trabajo establecida y se realizaron los ensayos de estabilidad y flujo a diferentes periodos de tiempo (0, 4, 8, 12, 16 y 20 días).

El levantamiento de la información se realizó de manera ordenada y sistemática, utilizando un sistema de codificación de las muestras y normatividad para cada ensayo.

Por último, se realizó un análisis económico para ver la viabilidad de la producción de este tipo de mezclas y se comparó con el costo de una mezcla con únicamente agregados naturales. Para lo anterior, se tuvo en cuenta los lugares de producción de los materiales, considerando el análisis los costos de adquisición y de acarreo hasta la planta de fabricación.

1.5 DEFINICIONES

En este aparte se presentan las definiciones de términos considerados básicos para el mejor entendimiento de este trabajo.

ASFALTO: Material cementoso de color marrón oscuro a negro constituido predominantemente por betunes que se producen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo (ASTM, 2015).

CEMENTO ASFÁLTICO: Asfalto fundente especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para uso directo en la fabricación de pavimentos bituminosos, y que tiene penetración a 25 °C (77 °F) de entre 5 y 300 décimas de milímetro, bajo una carga de 100g aplicados por 5 segundos (ASTM, 2015).

AGREGADO NATURAL: Agregado que consiste predominantemente de piedra, grava o arena que contiene una cantidad significativa de material limoso-arcilloso de menos de 75 µm (ASTM, 2015).

AGREGADO GRUESO: Agregado predominantemente retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) o la porción de un agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) (ASTM, 2015).

AGREGADO FINO: La porción de un agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y se retiene en el tamiz de 75 µm (No. 200) (ASTM, 2015).

PROCESO SIDERÚRGICO: Se denomina de esta manera a la serie de pasos consecutivos que llevan a una materia prima como el mineral de hierro y el carbón de coque, hasta un producto final como el acero (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1995).

RESIDUO SIDERÚRGICO: Material que se va formando durante todo el proceso siderúrgico y pierde toda su utilidad práctica. Entre estos se tiene escorias, polvos refractarios, etc. (Ortega, 1999).

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 (Fomento, Rural, & CEDEX, 2011).

ESCORIA DE HORNO AL OXÍGENO (BOF): Residuo siderúrgico que se genera durante la transformación del arrabio en acero, proceso que se realiza en el convertidor al oxígeno (Carvalho et al., 2017).

POLVO DE ALTO HORNO (BFD): Residuo del proceso de fabricación de arrabio en el alto horno. Material particulado que se genera junto a los gases durante la fundición del mineral de hierro, coque y caliza. No es lo mismo que la escoria de alto horno (D. Zhang et al., 2017).

CONCRETO ASFÁLTICO: Mezcla de agregado grueso, agregado fino y cemento asfáltico. En Colombia son conocidas como MDC (mezclas densas en Caliente), MSC (mezclas semi-densas en caliente), MGC (mezclas gruesas en caliente) y MAM (mezclas de alto módulo) (INVIAS, 2013a).

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 (Higuera, 2011).

PAVIMENTO FLEXIBLE: Todos aquellos que están formados por una capa bituminosa apoyada sobre una o varias capas de gran flexibilidad (base y subbase) que transmiten los esfuerzos al terreno de soporte o fundación mediante un mecanismo de disipación de tensiones, las cuales van disminuyendo con la profundidad. (Higuera, 2011).

DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS: Procedimiento realizado para definir los agregados pétreos y el cemento asfáltico, determinar los contenidos óptimos de ambos materiales para obtener una mezcla asfáltica de buen comportamiento (Rondón, Hugo & Reyes, 2016).

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD: Resistencia al paso de agua y aire hacia el interior o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por lo tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento (Garnica et al., 2005).

SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA: Propiedad de la mezcla asfáltica que se refiere a la capacidad para resistir la deformación y desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular (Garnica et al., 2005).

MÓDULO RESILIENTE: Característica de la mezcla asfáltica la cual hace referencia a relación entre el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (ASTM D 4123, 1995).

FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS: Fenómeno o mecanismo de daño en mezclas asfálticas en servicio. Se presenta cuando se generan elevadas deformaciones a tracción en la parte inferior de la capa asfáltica producto del paso de los vehículos, lo cual genera micro-fisuras y con el paso del tiempo macro-fisuras en la superficie del pavimento (N. Li et al., 2015).

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se reconoce que el uso indiscriminado de recursos naturales constituye una causa del deterioro del medio ambiente (V. R. Hernández & Marin, 2014). El reciclado y reutilización de residuos que se producen durante el proceso productivo y constructivo se ha extendido a todos los países desarrollados en los últimos años. Además, desde hace varios años se ha venido analizando el problema ambiental que se presenta con la generación de residuos y su vertido al medio. Problemas como destrucción de la capa de ozono, cambio climático, contaminación del agua, deficiencia en la calidad del aire y degradación de los sistemas naturales están ligados al sistema técnico industrial basado en recursos minerales no renovables (Cuchi, A & Sangrera, 2007).

Este trabajo centra su objetivo en la utilización de residuos siderúrgicos en carreteras, más concretamente, en la fabricación de concretos asfálticos. Primero se presenta información de algunos residuos utilizados en la construcción de carreteras y el uso de residuos siderúrgicos en concreto asfáltico, seguidamente se hace una descripción del proceso siderúrgico con el objeto de que el lector conozca cómo se generan los residuos utilizados. Por último, se hace una descripción de los métodos de diseño de mezclas asfálticas más utilizados y las pruebas de laboratorio para medir el desempeño de las mezclas.

Los objetivos de este capítulo son:

- Identificar la variedad de residuos con los cuales se ha investigado en la construcción de pavimentos.
- Conocer los resultados de investigaciones en las cuales han utilizado escorias como agregados en concretos asfálticos.
- Describir el proceso siderúrgico para conocer cómo se generan las escorias y demás residuos.
- Describir y comparar las metodologías de diseño de mezclas asfálticas.
- Explicar cada uno de las pruebas para medir el desempeño de las mezclas y presentar los diferentes criterios utilizados.

2.2 UTILIZACIÓN DE RESIDUOS EN PAVIMENTOS

Los asuntos relacionados con la conservación ambiental han tomado una importancia primordial en la sociedad. Las decisiones políticas, económicas y sociales relacionadas con este tema tienen hoy en día una mayor atención, y la búsqueda del desarrollo sostenible se ha convertido en uno de los objetivos prioritarios de los gobiernos. La tendencia de los últimos años en tema de gestión de residuos se relaciona con conservar (materiales y energía) y reducir, reutilizar, recuperar o reciclar (desechos). La eliminación de desechos se refiere a su depósito en vertederos o escombreras adecuadas para tal fin y la incineración para la generación de energía o la adopción de procesos que terminan produciendo alternativas de valor agregado (Ghosh, 2011).

Por su parte, el desarrollo económico y social esperado, motiva un incremento considerable en la demanda de carreteras, y con ellas, del consumo de agregados naturales. Por ejemplo, en Europa la producción de concreto asfáltico en el año 2015 fue de 278.8 millones de toneladas, los agregados suponen más del 90% en peso, lo que se traduce en un consumo de 250 millones de agregados naturales (EAPA, 2016). En Colombia la producción de rocas y materiales de construcción en general fue de 11.5 millones de metros cúbicos para el año 2015 y para el año 2025 se espera que esta producción se duplique (Mariño, 2016). En este sentido, la incorporación de materiales reciclados o residuos en la construcción de carreteras se percibe como una oportunidad para ahorrar recursos naturales y disminuir el impacto asociado con su extracción y transporte.

El papel que pueden desarrollar los residuos dentro del conjunto de la carretera como sustitutos de los áridos naturales puede variar. De esta forma, se podrá encontrar residuos tanto en terraplenes y capas granulares como formando parte de mezclas asfálticas, ya sea como agregado grueso, fino o ligante.

2.2.1 Residuos en concreto asfáltico. Dentro de los componentes de un concreto asfáltico, el más abundante, y por tanto el más consumido y el de mayor oportunidad de consumo de residuos puede ofrecer, son los agregados.

Desde hace mucho tiempo, la incorporación de residuos en mezclas asfálticas ha sido un desafío que ha permitido impulsar el desarrollo de procesos constructivos más sostenibles. En este ámbito, se encuentra que tanto la función desempeñada por los diferentes residuos utilizados (áridos, filler, aditivos o fibras), como la variedad en la tipología de éstos (aceros, polvo de neumático, plásticos, pavimentos reciclados, residuos de construcción entre otros), ha sido bastante amplia. Debido a ello, se pueden encontrar numerosas experiencias, algunas de las cuales se presentan a continuación, cuyo objetivo ha sido verificar la aptitud de algunos residuos para poder desempeñar este papel. Algunas de estas experiencias han tenido mayor aceptación, convirtiéndose en técnicas contrastadas, como pueden ser los casos del empleo de polvo de neumático o el reciclado de pavimentos.

El cemento asfáltico (AC) juega un papel fundamental en el comportamiento del concreto asfáltico, debido a su naturaleza visco-elástica y al efecto que tiene la temperatura y la carga de los vehículos asociadas a la mayoría de fallas en los pavimentos flexibles. La mejora del comportamiento del cemento asfáltico fue estudiada por Khan y otros en 2016, empleando polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE) y polvo de neumático (CR). Para lo cual midieron el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) del AC, utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR), con cada uno de los materiales (Khan et al., 2016). Estos autores utilizaron 2, 4, 8 y 10% en peso de cemento asfáltico de cada uno de los materiales y encontraron que la adición de estos, mejora el comportamiento elástico del cemento asfáltico lo que se traduce en la prolongación de la vida útil del pavimento en términos de susceptibilidad a la deformación plástica y al agrietamiento.

[Diab & You \(2017\)](#), caracterizaron la respuesta del cemento asfáltico modificado con polímeros y polvo de neumático, bajo pequeñas y grandes deformaciones, con el objetivo de entender el comportamiento de las mezclas bajo diversas condiciones posibles. Utilizaron estireno-butadieno-estireno (SBS) como polímero elastomérico, etileno-acetato de vinilo (EVA) como polímero plastomérico y polvo de neumático a diferentes porcentajes. [Bansal et al. \(2017\)](#), utilizaron desechos de plástico, bolsas de polietileno, botellas plásticas y neumáticos de caucho con el fin de desarrollar un asfalto modificado y contribuir con el medio ambiente ya que se podía eliminar gran cantidad de desechos. Realizaron el análisis mediante parámetros del ensayo Marshall sobre mezclas preparadas con los asfaltos modificados con plástico residual y polvo de neumático a diferentes proporciones. En ambos casos utilizaron polvo de neumático y plástico de desecho, el comportamiento del cemento asfáltico y las mezclas presentaron mejoras en la resistencia y durabilidad general de la mezcla y disminución en los costos de construcción de carreteras. Además, concluyen que la contribución con el medio ambiente es favorable al disminuir la contaminación en sus regiones.

En su estudio del año 2017, [Appiah y otros](#) evaluaron la utilización de polímeros termoplásticos de desecho para mejorar un asfalto convencional AC-20. Usaron polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP) y evaluaron los parámetros básicos como penetración, punto de ablandamiento y viscosidad ([Appiah et al., 2017](#)). En este análisis se comprobó que el asfalto con PP presento un pequeño incremento lineal en correspondencia con el porcentaje utilizado en los parámetros estudiados, mientras cambios más notorios con la adición de HDPE. La mejor mezcla se obtuvo con PP en una proporción de 3% en peso del asfalto.

En su artículo [Bulei et al. \(2018\)](#), hacen referencia a los problemas ambientales, que cada vez son más graves, con lo cual justifica el uso de desechos de neumático y de plástico en general en la construcción de pavimentos. Las investigaciones han demostrado la factibilidad de su utilización, ya sea como sustituto del agregado o como modificador del cemento asfáltico. El reciclaje de estos desechos para su utilización en ingeniería civil se considera como una solución ecológica y económica debido a las ventajas que pueden ofrecer. De igual forma, se ha planteado la utilización para producir y fabricar nuevos materiales compuestos como adoquines y baldosas

Otro residuo o desecho que afecta el medio ambiente y que se puede reciclar para su utilización en la fabricación de mezclas asfálticas es el vidrio. Un estudio de factibilidad para usar plástico y vidrio reciclados en reemplazo de agregados en una mezcla asfáltica, fue realizado por [Zakaria et al. \(2018\)](#), se usaron vidrios de botella y vidrio de pantalla de televisores LCD entre otros. La sustitución fue del 5% en peso de agregado, mezclando vidrio y plástico en diferentes proporciones. Los autores encontraron que las mezclas presentaron un comportamiento similar a la mezcla de control, en especial la mezcla con 1% de plástico y 4% de vidrio.

El vidrio reciclado se puede utilizar como polvo en reemplazo del material que pasa el tamiz #200 o como agregado en las mezclas asfálticas. En un estudio del año 2016, se incorporó vidrio triturado en tamaños de 0-0.315 mm y de 0.630 – 2.5 mm a cambio de la fracción del agregado fino natural de los mismos tamaños. Estos tamaños se combinaron en diferentes proporciones para obtener cinco contenidos de vidrio en la

mezcla, una vez diseñadas las mezclas se realizaron pruebas de desempeño como susceptibilidad a la deformación plástica, a la humedad y módulo dinámico (Lachance-Tremblay et al., 2016). El efecto de utilizar el polvo de vidrio como llenante mineral fue estudiado por Simone et al. (2017), el trabajo fue desarrollado en tres etapas: primero la caracterización del polvo de vidrio, seguido de estudios reológicos del cemento asfáltico con el polvo de vidrio y por último el análisis de las propiedades de la mezcla. En ambos casos las mezclas estudiadas mostraron comportamientos adecuados y en algunos casos características superiores a la mezcla de control.

Para tratar de controlar el agrietamiento producido por fatiga en mezclas asfálticas, un estudio reciente utilizó macro fibras de vidrio. La macro fibra utilizada tenía una longitud mayor que el tamaño máximo del agregado, esto con el fin de que influyera en el comportamiento de la formación y propagación de fisuras en el pavimento (Morea & Zerbino, 2018). La proporción de estas macro fibras utilizadas fue de 0.2%, 0.4% y 0.6 % del peso de la mezcla. Los autores encontraron con 0.4 % de macro fibra de vidrio la dosificación óptima, ya que esta mezcla presentó el mejor comportamiento en el ensayo de deformación plástica (ahuellamiento) y en el de fatiga.

El reciclado y utilización de residuos de la construcción y demolición (RCD) es una práctica utilizada en los países desarrollados ya que representa un aporte al medio ambiente. La industria de la construcción consume grandes cantidades de materia prima y genera grandes cantidades de residuos durante la construcción y demolición de edificios, carreteras, aceras, puentes, etc. Estos residuos están constituidos generalmente por bloques de concreto, mortero, ladrillo, concreto asfáltico, cerámica, yeso y madera entre otros. La generación de estos residuos se considera en la actualidad como una actividad que causa deterioro al medio ambiente (Mejía et al., 2015).

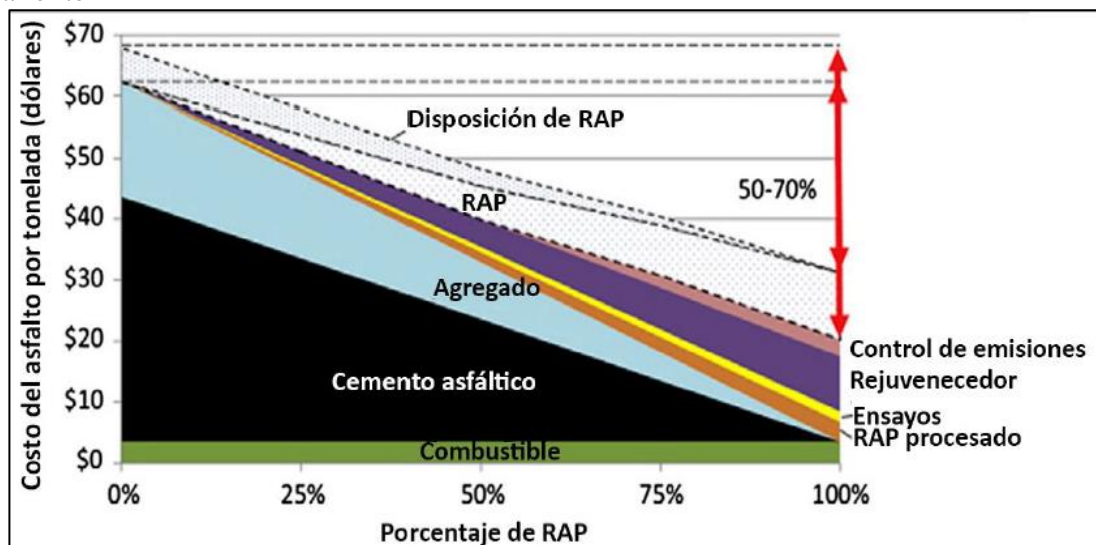
El reemplazo parcial o total de RCD por el agregado pétreo natural fino o grueso se hace cada vez más atractivo. Ossa, García, & Botero (2016) investigaron los efectos que tiene el empleo de RCD en mezclas asfálticas en caliente. Para lograr los objetivos de la investigación, realizaron una caracterización de los residuos y diseñaron cuatro mezclas con 10%, 20%, 30% y 40 % de RCD, midieron la susceptibilidad al daño por humedad y a la deformación plástica. Los resultados mostraron que hubo una disminución gradual en el parámetro TSR al ir incrementando la sustitución de agregado pétreo natural por reciclados y en cuanto a la deformación plástica todas las mezclas cumplieron los requisitos definidos para el caso de una zona templada y para una categoría de tránsito ligero.

Un residuo o desecho producido por la rehabilitación de pavimentos flexibles es el Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP, Recycled Asphalt Pavement por su sigla en inglés), el cual está compuesto principalmente por agregado grueso y cemento asfáltico. En la actualidad su uso se puede realizar en tres tipos de mezclas de acuerdo a la temperatura: en frío, tibio y caliente; siendo el mezclado en frío a temperaturas menores a 70 °C; mezclado en tibio a temperaturas entre 70 °C a 120 °C y el mezclado en caliente para temperaturas superiores a 120 °C. El RAP se considera una alternativa viable, dado que reduce la necesidad tanto de agregado virgen como de cemento asfáltico, que es el componente más costoso en la mezcla asfáltica. Estudios han demostrado que el

rendimiento de los pavimentos que contienen hasta un 20% de RAP es similar al de los pavimentos con materiales naturales sin RAP (Kim et al., 2017).

El beneficio en el uso de RAP en la construcción y/o rehabilitación de pavimentos flexibles con respecto a la forma convencional, pueden ser vistos de dos maneras, el ahorro económico y el beneficio ambiental. La comparación de costos en la rehabilitación de pavimentos asfálticos tanto por técnicas convencionales como con RAP, fue realizado por Zaumanis et al. (2014), los resultados mostraron que utilizando 50% de RAP reduce en 30% aproximadamente el costo con respecto a los métodos de rehabilitación convencionales, como se puede observar en la figura 1.

Figura 1. Costo de materiales y actividades en el reciclado de mezclas asfálticas en caliente



Fuente: Zaumanis et al. (2014)

En su tesis doctoral, Belmonte Sánchez (2009), relaciona otros tipos de residuos que se han utilizado en mezclas asfálticas como:

- Cenizas volantes a cambio de llenante mineral, lo cual repercute en una mejor trabajabilidad y una reducción de la energía de fabricación y puesta en obra.
- Residuos de mármol, el cual ofrece resultados satisfactorios ante deformaciones plásticas.
- Residuos de cobre, el cual tiene una elevada densidad y baja absorción, lo que se traduce en una reducción en el contenido de ligante en las mezclas.
- Residuos de cuero en mezclas en frío, presentando mejora en las propiedades de la mezcla.

2.2.2 Residuos siderúrgicos en concreto asfáltico. En los últimos años ha aumentado el número de investigaciones relacionadas con la utilización de residuos siderúrgicos en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentos. Sobre todo, lo que tiene que ver con

el uso de las escorias. Sin embargo, son escasos los estudios en los que utilizan el polvo de alto horno (BFD).

La utilización de escoria de horno de arco eléctrico (EAF) como sustituto de los agregados naturales en concretos asfálticos en pavimentos flexibles fue estudiado por [Marco Pasetto & Baldo \(2010\)](#), empleando pruebas de rendimiento de las mezclas a través de ensayos de deformación permanente, módulo de rigidez a diferentes temperaturas, fatiga y tracción indirecta. Por otro lado, [Marco Pasetto & Baldo \(2011\)](#), continuando con el estudio analizaron las propiedades químicas y el efecto de la lixiviación de la escoria EAF, además analizaron el comportamiento de las mezclas. En ambos casos las mezclas elaboradas con escoria EAF cumplen los requisitos de aceptación de las normas técnicas y recomiendan su utilización en la construcción de infraestructura vial. En cuanto a la lixiviación de metales pesados, todos están por debajo de 0.6% del volumen total de la escoria, lo cual está dentro del límite legal en Italia.

[Sorlini et al. \(2012\)](#), además de las propiedades de las mezclas, analizaron la expansión volumétrica asociada con la hidratación de CaO y MgO presentes en la escoria EAF al igual que el riesgo de contaminación por lixiviación de la escoria y de las mezclas elaboradas. Los resultados mostraron que la liberación de contaminantes está por debajo de los límites establecidos por el código italiano y en cuanto a la estabilidad volumétrica de la escoria recomendaron un periodo de hidratación de 2 a 3 meses para minimizar este efecto. [Ameri & Behnood \(2012\)](#), evaluaron la incorporación de escoria de acero y RAP en mezclas preparadas en frío. La evaluación mostró que el uso de escoria mejoró la estabilidad Marshall, el módulo elástico, la resistencia a la tracción, el daño por humedad y la resistencia a la deformación permanente.

En su estudio [Xie et al. \(2013\)](#), midieron el desempeño de mezclas asfálticas fabricadas con escoria BOF como agregado grueso, para lo cual realizaron ensayos de susceptibilidad a la humedad y midieron el comportamiento de la deformación permanente. [Ameri et al. \(2013\)](#), realizaron una evaluación a nivel de laboratorio de mezclas asfálticas en caliente con escoria de horno de arco eléctrico (EAF) en sustitución de agregado natural de piedra caliza. Aunque analizaron la inclusión de escorias diferentes, en ambos casos las mezclas mostraron una mejora en el comportamiento mecánico y dinámico, con lo cual ambos estudios recomiendan el uso de estas escorias en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentos.

El daño por fatiga de mezclas asfálticas que contienen escoria EAF como agregado grueso, y sometidas a envejecimiento a largo plazo fue estudiado por [Kavussi & Qazizadeh \(2014\)](#), para lo cual realizaron la prueba de flexión en cuatro puntos bajo esfuerzo controlado y a varios niveles de deformación, el envejecimiento de las mezclas fue realizado de acuerdo a la prueba AASHTO PP2. Los resultados evidenciaron que la inclusión de EAF mejoró la vida a la fatiga de las mezclas y en cuanto a las mezclas envejecidas no se vio cambio considerable en comparación con las mezclas no envejecidas. En su artículo [Lin et al. \(2015\)](#), realizaron una comparación de los resultados del análisis de tramos de prueba construidos con mezcla asfáltica convencional y mezclas asfálticas con escoria BOF, en laboratorio realizaron pruebas Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulo dinámico, midieron ahuellamiento y resistencia al

deslizamiento. De los resultados encontrados concluyeron que la incorporación de BOF puede extender la vida útil de las carreteras.

Las escorias han tenido un buen comportamiento dentro del funcionamiento y características de las mezclas asfálticas estudiadas, tal y como se mostró anteriormente y como se muestra de una manera más detallada a continuación de investigaciones recientes.

La interacción entre la escoria BOF y el cemento asfáltico fue estudiado por [Chen et al. en 2014](#), empleando escorias BOF sin hidratar e hidratadas durante 15 y 60 días a una temperatura de 60 °C. La medición del comportamiento de la unión entre el ligante y la escoria se llevó a cabo mediante la prueba de agua hirviendo de acuerdo a la norma ASTM D3625([ASTM, 2001](#)) y una prueba de tracción. Estos autores concluyeron que la escoria BOF, completamente hidratada es adecuada para preparar mezclas asfálticas resistentes a la humedad y en cuanto a la prueba de tracción la escoria BOF tiene un menor porcentaje de daño y mayores resistencias a la tracción en comparación con el basalto y el granito.

En cuanto al diseño de mezclas con adición de escoria, el objetivo principal es determinar el contenido de asfalto apropiado para unir las partículas de agregado. En un estudio, [Chen et al. \(2015\)](#) reemplazó una fracción del agregado fino con escoria BOF, la escoria se trabajó en su forma original y modificada, la cual fue sometida a lavado para retirar todas las impurezas. Después, ambas escorias fueron sometidas a exposición a la intemperie por un periodo de 12 meses. Luego, el diseño de la mezcla se realizó con base a las características volumétricas siguiendo la metodología Superpave para una mezcla con tamaño nominal máximo de 12.5 mm. Los resultados indicaron que el contenido de asfalto aumentó 0.5% en la mezcla con escoria original y 0.3% en mezcla con escoria modificada en comparación con la mezcla de control. En cuanto a la estabilidad Marshall, la mezcla con escoria modificada tuvo la mayor estabilidad mientras que la mezcla con escoria original mostró la estabilidad más baja. En otros resultados se observó que la mezcla con escoria modificada presentó menor profundidad de rodadura y mayor estabilidad dinámica en la prueba de resistencia a la deformación, mientras que la mezcla con escoria original mostro un comportamiento peor que la mezcla de control.

La escoria se puede utilizar de forma natural, es decir, tal como sale del proceso productivo o sometiéndola a tratamientos con el fin de mejorar sus propiedades. En un estudio reciente, [Xi, Xiang, & Li \(2016\)](#) evaluaron la incidencia del proceso de trituración en las características de la escoria BOF. En el proceso original la escoria era sometida a trituración en una trituradora de mandíbula y separadas las fracciones en una pantalla de vibración circular, sin embargo, con este método el agregado de escoria no era uniforme. Es así, que modificaron el proceso de la siguiente forma: inicialmente la escoria pasó por un tamiz de vibración para separar las partículas menores a 10 mm, luego paso por la trituradora de mandíbula y después por la trituradora de cono; después de esto los tamaños menores a 10 mm fueron eliminados nuevamente. Finalmente, la escoria fue lavada para eliminar el polvo y así garantizar una superficie limpia.

En una investigación en Taiwan, la escoria BOF se almacenó al aire libre durante tres meses para exponer el material a la humedad de precipitación natural con el fin de permitir la hidratación y su expansión antes de su uso en mezclas asfálticas ([J. S. Chen & Wei,](#)

2016). En este caso, se utilizó la escoria BOF como agregado grueso y se estudiaron tres tipos de mezclas: una con escoria y piedra natural, otra con solo escoria como agregado grueso y la tercera solo con piedra natural denominada de control. Como resultado encontraron que las mezclas con escoria presentaron una mayor resistencia a la humedad y una mayor resistencia a la deformación plástica en comparación con la mezcla convencional.

Sheng et al. (2017), investigaron los efectos de utilizar escoria BOF en polvo y fibra de poliéster en las propiedades reológicas del asfalto y las características de rendimiento de las mezclas. La escoria se trituró hasta tamaño menor a 0.075 mm; contiene aproximadamente 39% de SiO₂ y 41% de CaO. Para el análisis reológico del asfalto utilizaron el reómetro dinámico de corte (DSR) para medir el parámetro G*/senδ, el cual mide la resistencia del asfalto ante la deformación y el aporte de la componente elástica del desempeño del asfalto en el pavimento (Asphalt Institute, 2012) y el viscosímetro rotacional para medir la viscosidad, para lo cual mezclaron el asfalto virgen con diversos contenidos de escoria y fibra. Los resultados de estos ensayos mostraron que la escoria y la fibra tuvieron un efecto positivo en la viscosidad al igual que con el parámetro G*/senδ. En cuanto a las mezclas, el diseño experimental se realizó basado en cuatro tipos de mezclas en las que combinaron el polvo de piedra caliza, la escoria BOF y la fibra de poliéster (BOF y piedra caliza en 5% y la fibra de poliéster en 0.15% en masa de la mezcla). La escoria como relleno se comportó de manera más efectiva que el polvo de piedra caliza puesto que las mezclas con escoria mostraron mayor estabilidad Marshall, estabilidad dinámica, resistencia al daño por humedad y menor flujo.

Otro tipo de escoria es la de horno de arco eléctrico (EAF), la cual presenta buenas propiedades mecánicas para su uso en la fabricación de mezclas asfálticas (Skaf et al., 2017). La rigidez y la fatiga en mezclas que contenían EAF y RAP fueron estudiadas por Pasetto & Baldo (2017), para lo cual diseñaron seis tipos de mezclas en las cuales variaron la proporción de EAF y RAP. Para la investigación, se tuvo en cuenta el contenido de asfalto contenido en el RAP el cual era de 4.3 % en peso del agregado. La prueba de flexión en cuatro puntos fue aplicada para obtener los datos de rigidez y fatiga en cada una de las mezclas, de acuerdo a la norma europea EN 12697. El análisis de los datos de fatiga se ejecutó por el método de energía disipada, el cual considera un valor de meseta (PV) de la relación de cambio de energía disipada (RDEC) (Carpenter & Shen, 2006). El incremento considerable de la resistencia a la fatiga en las mezclas con EAF fue atribuida a la textura rugosa de los granos de la escoria, la cual condujo a una mejor adhesión de la película de asfalto.

La escoria de horno de arco eléctrico EAF es un agregado rugoso, poroso y con pequeñas inclusiones de partículas de hierro. Esta escoria tiene propiedades mecánicas muy similares y en algunos casos superiores a los agregados naturales utilizados convencionalmente. De acuerdo a Skaf et al. (2017), las características físicas y mecánicas más notables de la EAF son: es un agregado no plástico, con bajo contenido de finos, gran angularidad y textura rugosa, alta densidad, mayor porosidad y absorción. Sin embargo, también este tipo de escoria presenta algunos inconvenientes como: un mayor costo en el transporte teniendo en cuenta su alta densidad y debido a su naturaleza podría mostrar inestabilidad volumétrica con aumento de volumen en presencia de agua (M. Pasetto et al., 2017).

El pavimento asfáltico puede estar expuesto a diferentes factores como agua, cargas del tránsito y en algunos lugares a cambios extremos de temperatura, los cuales contribuyen al deterioro prematuro del pavimento. En zonas donde se presentan estaciones es común que el pavimento este sometido a ciclos de congelamiento y deshielo, por lo cual es importante estudiar este fenómeno con la inclusión de escoria en las capas de rodadura en los pavimentos flexibles. Lo anterior fue estudiado por [Fakhri & Ahmadi \(2017\)](#), para lo cual utilizaron escoria EAF y RAP, sometiendo la mezcla a envejecimiento y a cinco ciclos de congelamiento y deshielo. Luego, se ensayaron las muestras a 25 °C en una configuración de flexión de tres puntos para determinar la resistencia a la fatiga ([Saha & Biligiri, 2016](#)) y el índice de flexibilidad. Los resultados indicaron que la inclusión de EAF como agregado grueso y RAP como agregado fino es beneficioso para las mezclas debido a que la resistencia a la fatiga y el índice de flexibilidad presentaron mejores resultados que la mezcla de control.

Las características de las escorias en términos de propiedades físicas, mecánicas y químicas son de importancia relevante cuando se pretenden usar como agregado en capas estructurales en pavimentos. En cuanto a las propiedades física y según [Gökalp et al. \(2018\)](#), las escorias presentan una textura superficial más rugosa en comparación con un agregado de piedra caliza, además las escorias tienen una estructura superficial más porosa que los agregados naturales lo cual indica más altos niveles de absorción de agua. Las propiedades mecánicas, de acuerdo a algunos investigadores ([M. Pasetto et al., 2017](#)), como la dureza, resistencia al pulido y adhesividad en algunos casos son mejores en las escorias que en los agregados naturales. Las composiciones químicas y mineralógicas de las escorias EAF y BOF son similares, el óxido de calcio y el óxido de hierro son los dos componentes químicos principales ([Yildirim & Prezzi, 2011](#)). De igual forma según [Aziz et al. \(2014\)](#), los dos tipos de escorias se caracterizan por el silicato dicalcico, el cual proporciona estabilidad evitando la desintegración de la escoria. Aunque las propiedades dependen de cada siderurgia y de la calidad del acero que se produzca, en general las escorias presentan características y propiedades que en algunos casos son mejores que las de los agregados naturales.

En un estudio reciente utilizaron polvo de escoria EAF para modificar el asfalto, fabricar mezclas asfálticas y medir parámetros como estabilidad y flujo Marshall, además medir parámetros volumétricos y hacer la comparación de los resultados con una mezcla convencional de control ([Loaiza & Colorado, 2018](#)). Los componentes principales de la escoria utilizada fueron óxido de hierro y óxido de zinc. La modificación del cemento asfáltico la realizaron con la inclusión de 10% y 20% en peso de polvo EAF dado que en proporciones menores no encontraron cambios significativos en las propiedades mecánicas del asfalto. Con cada uno de estos asfaltos fabricaron mezclas y encontraron que la rigidez de la mezcla aumentó con la adición del polvo EAF, algunas mezclas no cumplieron todos los parámetros, pero en general se observó una mejora significativa en el comportamiento de estas mezclas.

2.3 PROCESO SIDERÚRGICO

Los principales insumos utilizados en la fabricación del acero son el mineral de hierro, el carbón, la chatarra y la energía eléctrica ([Molina, 2013](#)). La importancia de estos insumos

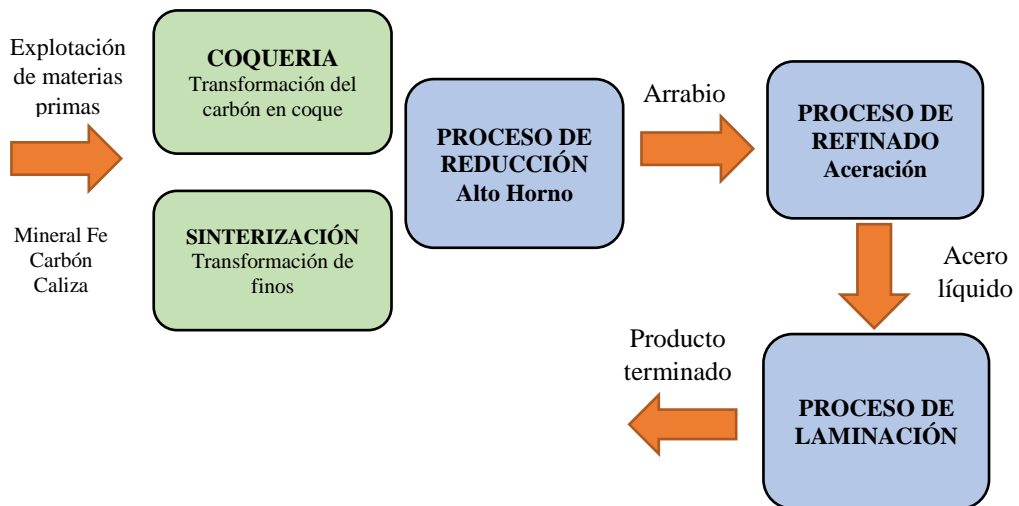
varía de acuerdo a la tecnología utilizada en cada fábrica. Las fábricas de acero de todo el mundo se clasifican según su proceso productivo como (Barreto Bernal et al., 2014):

- Siderúrgica integrada, es aquella en la que operan las tres fases básicas que son: reducción, refinado y laminación. Estas parten del mineral de hierro y el carbón.
- Siderúrgica semi-integrada, aquella que operan en dos fases: el refinado y laminación. Estas parten de chatarra metálica para transformarla en acero y su posterior laminación.

2.3.1 Proceso siderúrgico integrado. En este proceso se parte de la explotación de las materias primas: el mineral de hierro, el carbón y la caliza. Estos materiales llegan a la primera fase denominada fabricación primaria; de esta fase hacen parte los procesos de transformación del carbón en coque en la planta de coquería, la planta de sinterización, la cual transforma los finos (mineral de hierro, coque y caliza) a una granulometría apta para seguir el proceso y la reducción, en el alto horno en el cual se funden las materias primas y se transforman en arrabio. La segunda fase llamada de refinado o aceración, la cual se encarga de transformar el arrabio procedente del alto horno en acero y la tercera fase de laminación la cual se encarga de transformar el acero en producto terminado final.

En la figura 2, se muestra el flujo general de una siderurgia integral donde se indica cada una de las fases productivas.

Figura 2. Flujo general del proceso siderúrgico integrado.



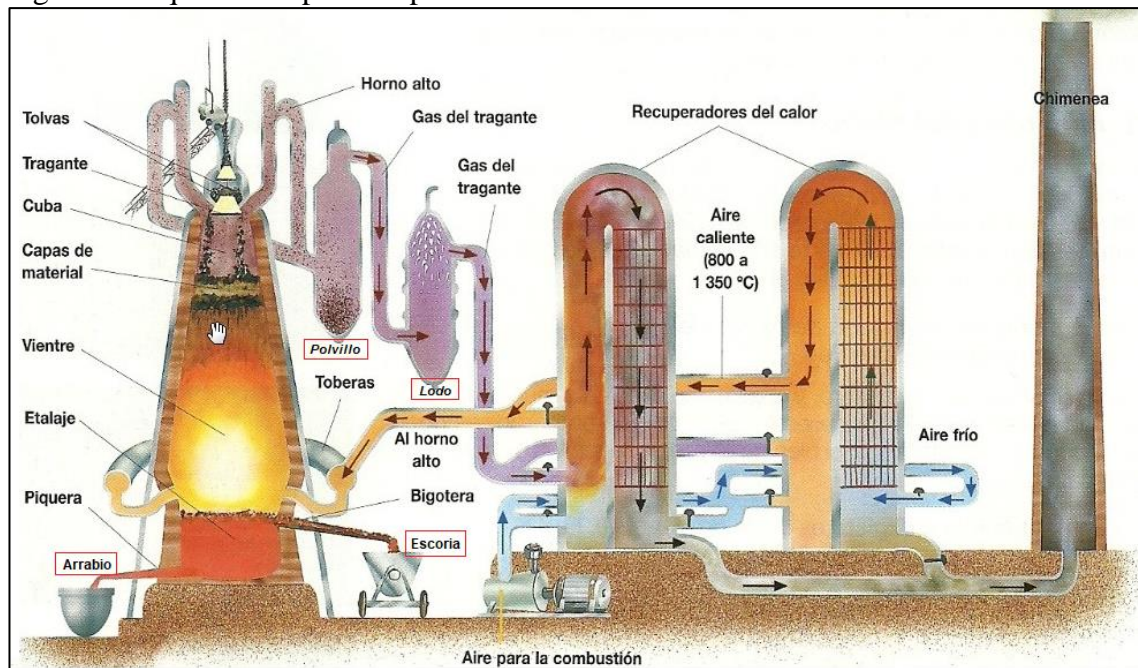
Fuente: El autor

Durante este proceso siderúrgico integrado se generan residuos en cada una de sus fases, en el caso del proceso de reducción en el alto horno se genera escoria, polvo y lodos de alto horno, figura 3. La escoria de alto horno (BFS) se genera por la segregación de impurezas y está compuesta por silicatos y óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio (Lobato et al., 2015). Esta escoria es considerada como un material hidráulico latente, no metálico (Gutiérrez-junco et al., 2015). El polvo de alto horno (BFD) es un residuo sólido

que no tiene mucha utilización, contiene principalmente hierro, carbono y bajas cantidades de silicio, aluminio, calcio y magnesio (T. Hu et al., 2017). El lodo contiene hasta un 50% de hierro y es un material muy fino (Drobíková et al., 2016). Tanto el polvo como el lodo se generan durante la limpieza de los gases producidos por la reducción de las materias primas. La generación típica de escoria de alto horno es de 200 a 400 kg, de polvo es de 7 a 45 kg y de lodo de 6 kg por tonelada de arrabio aproximadamente (Lobato et al., 2015).

El proceso de refinado consiste en la transformación del arrabio en acero, durante este proceso se ajusta la composición de acuerdo a la calidad del acero a producir. Las materias primas en este proceso son: chatarra metálica, arrabio, fundente (cal), ferroaleaciones y oxígeno (Ruuska et al., 2015). Se inicia con el cargue de chatarra, el fundente y el arrabio en el convertidor, figura 4, se inyecta oxígeno por medio de una lanza por un tiempo aproximado de 15 minutos, el oxígeno reacciona con el carbono del arrabio y lo elimina en forma de bióxido y monóxido de carbono (Lu et al., 2018). En este proceso se genera la escoria BOF cuya producción típica es de aproximadamente 200 kg por tonelada de acero líquido producido (Das et al., 2007), (Marhual et al., 2011).

Figura 3. Esquema del proceso productivo de un alto horno



Fuente: <https://tecnopnf.blogspot.mx/2014/11/como-funciona-un-alto-horno.html>

El proceso de laminación consiste en la transformación del acero procedente de la acería, una vez que pasa por colada continua, en el producto terminado final (varillas o láminas), figura 5. Esta transformación se realiza en trenes de laminación y durante este proceso se genera un subproducto llamado cascarilla de laminación que está constituido, fundamentalmente, por hierro y óxido de hierro y contenidos variables de grasa y aceites. Su producción aproximada es de 35 a 40 kg por tonelada de acero (López et al., 2003).

Figura 4. Descargue de arrabio en el convertidor



Fuente: Acerías Paz del Río S.A. Tomado de: <http://www.pazdelrio.com.co/es-es/Paginas/default.aspx>

Figura 5. Producto terminado de laminación

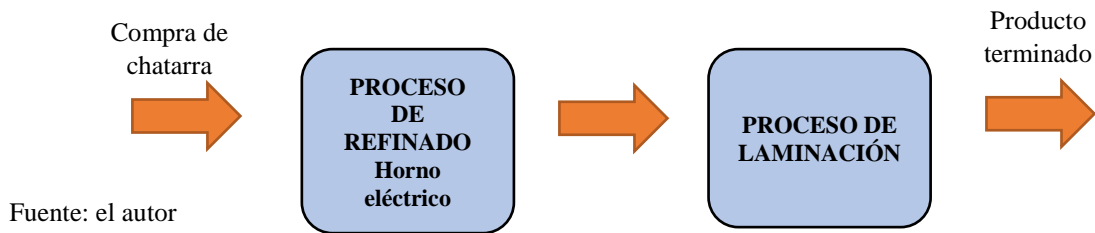


Fuente: Acerías Paz del Río S.A. Tomado de: <http://www.pazdelrio.com.co/es-es/Paginas/default.aspx>

2.3.2 Proceso siderúrgico semi-integrado. Este proceso inicia en la etapa de refinado, el cual es la transformación de la chatarra metálica en acero por medio de un horno eléctrico. Posteriormente, en el proceso de laminación se realiza la transformación del acero en el producto terminado final.

En la figura 6, se muestra el flujo general de una siderúrgica semi-integral donde se indican las fases productivas.

Figura 6. Flujo general del proceso siderúrgico semi-integrado.



Fuente: el autor

Al igual que en el proceso integrado, en este proceso durante cada fase productiva se generan residuos. El proceso de refinado en el horno eléctrico inicia con el cargue de la chatarra, el proceso de fundición comienza bajando los electrodos hasta establecer arcos eléctricos entre los electrodos y la chatarra metálica, figura 7. El calor generado provee la energía necesaria para la fundición del metal (Issouribehere et al., n.d.). Como residuo del proceso se genera la escoria de horno de arco eléctrico (EAF) (Arribas et al., 2015). La producción típica de esta escoria es de aproximadamente 130 a 180 kg por tonelada de acero líquido producido (Borges, 2004). El proceso de laminación es igual que en el proceso de siderurgias integradas.

Figura 7. Horno de arco eléctrico.



Fuente: <https://www.refra.com/es/Hornos-de-arco-electrico/>

Los altos hornos, en el proceso siderúrgico integrado, controlan aproximadamente el 60% de la producción mundial de acero líquido; los hornos eléctricos en el proceso semi-integrado el 33% y la demás producción corresponden a tecnologías obsoletas (Franco et al., 2010). En Colombia solamente Acerías Paz del Río S.A. es una planta siderúrgica integrada y empresas como Diaco, Sidoc, Sidenal, Siderúrgica de Caldas y otras producen sus aceros en hornos eléctricos. El 65% de la producción nacional se genera en siderúrgicas semi-integradas (Franco et al., 2010).

2.4 MATERIALES PARA CONCRETOS ASFÁLTICOS

Una mezcla de concreto asfáltico se define como la combinación de agregados pétreos seleccionados y un ligante asfáltico que por lo general es el cemento asfáltico. La selección y dosificación de cada uno de los materiales influyen directamente en las propiedades físicas que resulten de esta mezcla, así como su comportamiento mecánico y dinámico.

El agregado constituye aproximadamente el 95% de una mezcla asfáltica en peso, mientras el ligante asfáltico constituye el 5% restante. En volumen, una mezcla asfáltica típica es aproximadamente 85% de agregado, 10% de ligante y 5% de aire. La falta de calidad en alguno de estos componentes afectará la calidad y comportamiento de la mezcla. Por lo anterior, un buen diseño parte de la escogencia y caracterización de cada uno de los materiales que la componen (NCHRP, 2011).

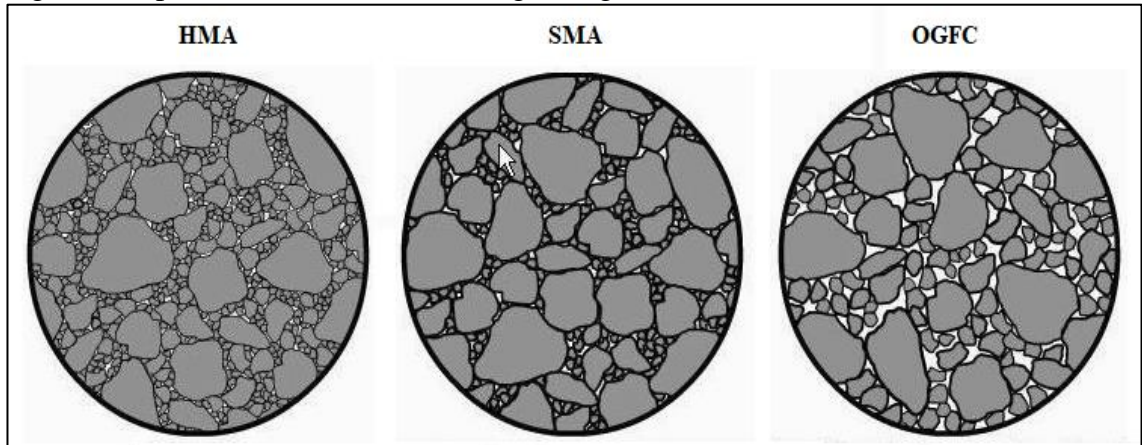
2.4.1 Agregados pétreos. Este material juega un papel importante en el desempeño del concreto asfáltico (Hosseinzadeh et al., 2016). Los agregados pétreos deben tener una granulometría adecuada y cumplir unos requisitos mínimos de calidad, por lo cual es necesario realizar una caracterización detallada.

2.4.1.1 Granulometría. Una propiedad importante es la distribución de los tamaños del agregado, el control de la distribución del tamaño de los agregados es lo que se llama granulometría y es fundamental para el desarrollo del diseño de la mezcla. La distribución de tamaños debe tener la cantidad justa para que la mezcla resultante contenga la cantidad óptima de asfalto y vacíos con aire.

Los límites de las especificaciones manejan un amplio rango, lo cual ayuda a lograr la combinación correcta para diferentes aplicaciones. Según la granulometría las mezclas en caliente se pueden clasificar como: mezcla continua (HMA), mezcla discontinua (SMA) y mezcla abierta (OGFC), figura 8. La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida y a las especificaciones a cumplir en cada proyecto.

- Mezcla asfáltica continua (HMA), contiene todos los tamaños de partículas de agregado. Hay suficientes partículas finas para separar eficazmente muchas de las partículas gruesas. Por lo tanto, la transmisión de esfuerzos a través de la estructura de la mezcla se basa tanto en las partículas gruesas como en las finas. Los vacíos con aire están cercanos al 4%.
- Mezcla asfáltica discontinua (SMA), contiene pocas partículas de tamaño medio, predominan los tamaños gruesos y finos. La transmisión de esfuerzos pasa a través de la matriz de partículas gruesas.
- Mezcla asfáltica abierta (OGFC), contiene pocas partículas de agregado fino. Esto crea grandes vacíos de aire entre las partículas gruesas y medianas, puede estar entre 15% y 20% del volumen.

Figura 8. Tipos de mezclas asfálticas según la granulometría.



Fuente: <https://pavementengineering.blogspot.mx>

En Colombia, las mezclas asfálticas en caliente de gradación continua y en función de la granulometría se clasifican como: mezclas densas (MDC), mezclas semidensas (MSC) y mezclas gruesas (MGC) (INVIAS, 2013a). En la tabla 1, se muestran las franjas granulométricas para cada tipo de mezcla y su designación.

Tabla 1. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente

Tipo de Mezcla	Tamiz (mm/U.S. Standard)									
	37.5 1 ½"	25.0 1"	19.00 ¾"	12.50 ½"	9.50 3/8"	4.75 N. 4	2.00 N. 10	0.425 N. 40	0.180 N. 80	0.075 N. 200
	% Pasa									
Densa	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	16-29	9-19	5-10
Semi Densa	MSC-25	100	85-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19		100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013. Artículo 450-13.

La metodología Superpave utiliza el diagrama de potencia 0.45 para definir la granulometría, (R. B. McGennis et al., 1995). La gráfica granulométrica se construye graficando en el eje de las abscisas la abertura del tamiz en milímetros elevada a la potencia 0.45 y en el eje de las ordenadas el porcentaje que pasa de cada material pétreo en cada tamiz. Posteriormente, se grafican los puntos de control especificados en la tabla 2, de acuerdo a la designación por el tamaño máximo nominal y la línea de máxima densidad, la cual es una línea recta que se traza del origen hasta el tamaño máximo del agregado al 100 %. En la figura 9 se muestra los puntos de control y la línea de máxima densidad para el tamaño máximo nominal de ¾" (19 mm).

Tabla 2. Granulometría Superpave.

Tamiz		Tamaño máximo nominal del agregado pétreo				
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5
Designación	Abertura (mm)	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"
		% que Pasa				
2"	50	100				
1 ½"	37.5	90-100	100			
1"	25	-90	90-100	100		
¾"	19		-90	90-100	100	
½"	12.5			-90	90-100	100
3/8"	9.5				-90	90-100
No. 4	4.75					-90
No. 8	2.36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
No. 16	1.18					
No. 30	0.60					
No. 50	0.30					
No. 100	0.15					
No. 200	0.075	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: [Delgado Alamilla et al., 2006](#)

La curva granulométrica estará dentro de los puntos de control especificados y podrá cruzar una sola vez la línea de máxima densidad.

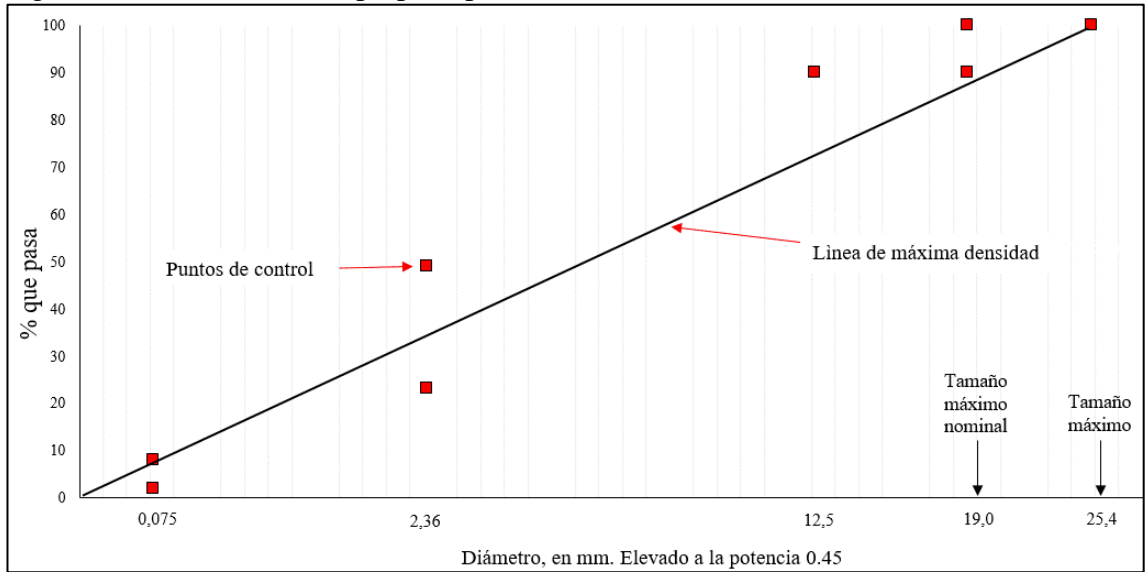
Anteriormente, estas especificaciones incluían una zona restringida, cuyo origen viene del proyecto SHRP (*Strategic Highway Research Program*) que dio origen a Superpave. Inicialmente, esta zona restringida fue una recomendación tomada como especificación por algunas agencias. La recomendación era que las granulometrías no pasaran por la zona restringidas para no tener problemas con la mezcla como deformación plástica, entre otros. Algunas agencias se quejaron debido a que contaban con granulometrías que pasaban por la zona restringida y las mezclas se comportaban de una manera adecuada y para cumplir con el requisito de no pasar por dicha zona debían incluir costos como nueva trituración o acarreo de nuevos materiales, que incrementaban el costo de producción de la mezcla. Razón por la cual encargaron al Centro Cooperativo Nacional de Investigaciones de Carreteras (NCHRP) de realizar la investigación al respecto. Los resultados de dicha investigación fueron publicados en el año 2001 ([Kandhal & L.A. Cooley, 2001](#)), dando origen a la abolición de la zona restringida.

Algunas de las conclusiones de este estudio y que soportan la decisión de abolir la zona restringida son:

Las mezclas que cumplen con los requisitos Superpave y angularidad del agregado fino con granulometrías que violaron la zona restringida, se comportaron de forma igual o mejor que mezclas con granulometrías que pasaron por fuera de la zona restringida. Esta conclusión se extrae de mezclas con gradaciones de TMN de 9.5 a 19 mm, con números de giros de diseño de 75, 100 y 125 en el compactador giratorio y está respaldado por extensos e independientes resultados en la literatura.

El requisito de zona restringida es redundante para mezclas que cumplen con los requisitos Superpave y angularidad del agregado fino requeridos. Las referencias a la zona restringida, ya sea como requisito o una directriz, deben eliminarse de las especificaciones AASHTO y prácticas de diseño Superpave para mezclas HMA, independiente de las especificaciones de granulometría o nivel de tránsito.

Figura 9. Granulometría Superpave para tamaño máximo nominal 19.0 mm



Fuente: [Gamica et al., 2004](#)

De igual forma, la recomendación del estudio realizado por NCHRP dice ([Kandhal & L.A. Cooley, 2001](#)):

El objetivo principal de este proyecto de investigación fue determinar bajo qué condiciones, si corresponde, el cumplimiento del requisito de zona restringida es necesario cuando una mezcla asfáltica cumple con los requisitos Superpave, angularidad de finos y criterios volumétricos como vacíos en el agregado mineral. Los resultados del estudio demostraron que la zona restringida es redundante en todas las condiciones. Por lo tanto, toda referencia a la zona restringida debe eliminarse completamente para evitar cualquier confusión en la implementación.

2.4.1.2 Caracterización de los agregados pétreos. Teniendo en cuenta la importancia del agregado pétreo en el desempeño de la mezcla asfáltica, es necesario realizar unas pruebas ([R. McGennis et al., 2012](#)), para conocer las propiedades y compararlas con las especificaciones respectivas para cada proyecto ([Delgado Alamilla et al., 2006](#)). El agregado pétreo dentro de la mezcla asfáltica se divide en agregado grueso (retenido en tamiz No. 4) y agregado fino (Pasa tamiz No. 4).

- Pruebas de consenso. Son aquellas consideradas críticas para alcanzar un elevado desempeño de la mezcla asfáltica. Estas propiedades deben satisfacer los requerimientos dependiendo del nivel de tránsito y la estructura de pavimento considerada. Las propiedades de consenso son:
 - Angularidad del agregado grueso
 - Angularidad del agregado fino
 - Partículas alargadas y planas
 - Equivalente de arena

- Pruebas de origen. Son aquellas frecuentemente utilizadas para calificar las fuentes de los agregados. Las propiedades de origen son:
 - Dureza mediante la prueba de desgaste en la máquina de los Ángeles
 - Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval
 - Durabilidad mediante el ensayo de solidez
- Pruebas de rutina. Son aquellos parámetros que inciden en el diseño de la mezcla asfáltica. Las propiedades de rutina son.
 - Gravedad específica agregado grueso
 - Gravedad específica agregado fino
 - Absorción (gruesos y finos)

2.4.2 Ligante asfáltico. El ligante asfáltico utilizado en mezclas en caliente es el cemento asfáltico, se designa por las letras AC (Asphalt Cement). Es un componente esencial en el concreto asfáltico puesto que mantiene unidos los agregados. Es un subproducto de la refinación del petróleo. A temperatura ambiente es sólido, por lo cual hay que calentar a altas temperaturas (135 a 160 °C) para que pueda cumplir su función de adherir los agregados pétreos.

El cemento asfáltico se puede clasificar de acuerdo a su consistencia, para lo cual se realizan los ensayos de viscosidad y penetración. En algunos países es clasificado de acuerdo a su grado de desempeño PG (Performance Grade), el cual es el rango de temperaturas, máxima y mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente.

2.4.2.1 Clasificación de acuerdo a la penetración. En Colombia los cementos asfálticos se clasifican por su penetración de acuerdo a la norma INV E-706-13 (INVIAS, 2013g) y ASTM D5 (ASTM, 2006), el cual mide la consistencia del cemento asfáltico, expresada por medio de la distancia, en décimas de milímetros, hasta la cual penetra una aguja normalizada en el material a una temperatura de 25 °C (77 °F), durante 5 segundos y con una carga de 100 gramos, incluyendo la aguja.

Los cementos asfálticos producidos en Colombia son: CA 40-50, CA 60-70 y CA 80-100. Los requisitos mínimos de calidad que deben cumplir para poder ser utilizados en mezclas asfálticas en caliente, se muestran en la tabla 3, de acuerdo a la Artículo 450-13 del INVIAS (INVIAS, 2013a).

El cemento asfáltico 80-100 se recomienda utilizar en zonas con temperaturas medias anuales ponderadas (TMAP) menores a 24 °C, mientras que los cementos asfálticos 40-50 y 60-70 para zonas con temperaturas mayores a 24 °C.

2.4.2.2 Clasificación de acuerdo a la viscosidad. Los cementos asfálticos se clasifican como: AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40. En la tabla 4 se muestran los requisitos mínimos de los cementos asfálticos clasificados por grado de viscosidad a 60 °C. Esta clasificación es adoptada en países como México y Costa Rica. (Delgado Salazar, 2011).

Tabla 3. Requisitos mínimos del cemento asfáltico.

Característica	Unidad	Norma	Grado de penetración					
			40-50		60-70		80-100	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<i>Asfalto original</i>								
Penetración (25°C, 100g, 5 s)	0.1 mm	INV E-706 ASTM D5	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712 ASTM D36-95	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	-	INV E-724 NTL 181	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad absoluta (60°C)	P	INV E-716 ASTM D4402	2000	-	1500	-	1000	-
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	Cm	INV E-702 ASTM D113	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en Tricloroetileno	%	INV E-713 ASTM D2042	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua	%	INV E-704 ASTM D95	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de inflamación	°C	INV E-709 ASTM D92	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas	%	INV E-718 UNE EN-12606	-	3	-	3	-	3
<i>Asfalto residual, después del ensayo de película delgada en el horno rotatorio (RTFOT)</i>								
Pérdida de masa por calentamiento	%	INV E-720 ASTM D2872	-	0.8	-	0.8	-	1.0
Penetración del residuo, en % de la penetración original	%	INV E-706 ASTM D5	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento	°C	INV E-712 ASTM D36-95	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento relación de viscosidad (60°C del asfalto residual y original)	°C	INV E-716 ASTM D4402	-	4	-	4	-	4

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS-2013. Artículo 410-13.

Tabla 4. Requisitos mínimos para cementos asfálticos, clasificados por viscosidad

Característica	Unidad	Norma ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60 °C	P	D2170	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad, 135 °C Mínimo	mm ² /s	D2170	125	175	250	300	350	400
Penetración. 25 °C, 100 g, 5 s Mínimo	0.1 mm	D5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación Mínimo	°C	D92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno Mínimo	%	D2042	99	99	99	99	99	99
<i>Pruebas sobre residuos del ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFOT)</i>								
Viscosidad, 60°C Máximo	P	D2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min. Mínimo	cm	D113	100	100	75	50	40	25

Fuente: Delgado Salazar, 2011.

El principio fundamental de la caracterización por grado de viscosidad es determinar la viscosidad absoluta a 60 °C y asignar como resultado o consistencia obtenida el grado AC

correspondiente, para luego verificar los demás requisitos en el resto de ensayos especificados.

2.4.2.3 Clasificación de acuerdo al grado de desempeño PG. La prueba que indica Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*) para la caracterización y clasificación del cemento asfáltico tienen como objeto analizar el comportamiento bajo condiciones iniciales del asfalto original y del asfalto puesto a servicio. El cemento asfáltico va cambiando sus propiedades durante tres etapas. La primera etapa corresponde al transporte, almacenamiento y manejo; la segunda etapa se lleva a cabo durante la producción, mezcla y construcción; finalmente, la tercera etapa corresponde al envejecimiento desde que se coloca la mezcla asfáltica hasta el fin de su vida de diseño (Vacca-Gomez et al., 2012).

Los ensayos de laboratorio se realizan con el objeto de evaluar las propiedades físicas del cemento asfáltico, los cuales deben realizarse con el material original y envejecido. En el envejecimiento se produce pérdida de los componentes volátiles y oxidación del asfalto, lo que genera un incremento en la viscosidad del asfalto con un endurecimiento de la mezcla (Airey, 2003). Para envejecer el cemento asfáltico se utiliza el horno rotatorio de película delgada (RTFO), el cual simula el envejecimiento que ocurre en las plantas durante la elaboración de la mezcla de concreto asfáltico en caliente y el horno de envejecimiento a presión (PAV), el cual simula el envejecimiento después de varios años de servicio de un pavimento.

El grado de desempeño o grado PG XX-YY, es el rango de temperatura, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. (XX ° C) es la temperatura máxima y (YY ° C) es la temperatura mínima. El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico adecuado, en función del clima y del nivel del tránsito bajo los cuales va a estar sometido el pavimento.

La selección adecuada del grado PG de un cemento asfáltico favorece el comportamiento de la capa asfáltica ante el ahuellamiento y la formación de grietas por fatiga y temperatura (Hassan et al., 2008). La tabla 5, muestra la clasificación de asfaltos grado PG, junto con los parámetros que se deben evaluar para clasificar el cemento asfáltico (SCT, 2005). Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de 6 ° C, las temperaturas máximas se consideran de 64 ° C a 88 ° C y las mínimas de -40 ° C a -22 ° C. Por ejemplo, un cemento asfáltico que está clasificado como PG 64-22 debe satisfacer con los requerimientos de las propiedades físicas a altas temperaturas hasta 64 ° C y bajas temperaturas hasta los -22 ° C.

Superpave recomienda que el cálculo para la temperatura máxima para el diseño del pavimento sea ubicado a una profundidad de 20 mm por debajo de la superficie del pavimento y la temperatura mínima se calcule en la superficie del pavimento. El modelo para el cálculo de la temperatura máxima se presenta en la ecuación 1 y el de la temperatura mínima en la ecuación 2, de acuerdo a las recomendaciones del Instituto del Asfalto (Muzaffar Khan et al., 2013), (Hassan et al., 2008).

Tabla 5. Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	> -22	> -28	> -34	> -40	> -22	> -28	> -34	> -40	> -22	> -28	> -34	> -22	> -28	> -34	> -22	> -28	> -34
Asfalto original																	
Punto de inflamación Cleveland ¹ , °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135 °C ¹ ; Pa-s (P ²), máx.	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) ^{1,3} . Kpa, mín	1																
-Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada (RTFO)																	
Perdida por calentamiento; %, máx	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) ¹ . Kpa, mín	2.2																
-Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento a horno de presión temperatura y aire (PAV)																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C																	
-Climas normales	100				100				100			100			100		
-Climas desérticos	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico ⁴ , máx.	Reportar																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) ¹ , Kpa, máx.	5000																
Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de flexión S(t) ^{1,5} , Mpa, máx. (m=0.3 min)	300																
Temperatura de prueba @ 60 s, °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24
Tensión Directa Tensión de falla ⁵ . 1.0%, mín.	1																
Temperatura de prueba @ 1.0 mm/min. °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

¹ Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda de los Manuales que señalan en la cláusula C de la norma N-CMT-4-05-004/05 (México)

² Poises

³ Para control de calidad de producción de asfaltos normales sin modificar, cuando sea líquido newtoniano, la viscosidad dinámica del cemento asfáltico original puede sustituir al módulo de corte dinámico G*/senδ, a las temperaturas de prueba.

⁴ El endurecimiento físico del asfalto es desarrollado de acuerdo con el número de muestras de viga, conforme a la determinación de la rigidez de flexión, mediante el reómetro de flexión de viga BBR, excepto que las condiciones de tiempo se extiendan a 24 h y el valor m sea reportado únicamente para propósitos de información.

⁵ Si la rigidez de flexión es menor de 300 MPa, no es necesario la prueba de tensión directa. Si la rigidez de flexión resulta entre 300 y 600 MPa, se requiere que la deformación a la ruptura en la prueba de tensión directa cumpla también con lo indicado en la tabla. El valor m requerido será satisfactorio en ambos casos

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes- México. Norma N-CTM-4-05-004/05

$$T_{m\acute{a}x.} = T_{20mm} = (T_{air} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.22) * (0.9545) - 17.78 \quad (1)$$

Donde, T_{20mm} =Temperatura máxima de diseño a 20 mm de la superficie del pavimento en  C, T_{air} =temperatura del aire promedio de los siete días de máxima temperatura en el año de la zona del proyecto, Lat = latitud geográfica de la zona del proyecto en grados decimales.

$$T_{mín} = 0.859T_{air} + 1.7 \quad (2)$$

Donde, $T_{mín}$ =Temperatura mínima de diseño en la superficie del pavimento en  C, T_{air} =Temperatura del aire promedio del día en el año más frío en la zona del proyecto.

SHRP estableció el programa de monitoreo de pavimentos a largo plazo (LTPP, *Long Term Pavement Performance*) en 1987, para respaldar una amplia gama de análisis del rendimiento del pavimento con el objetivo de mejorar las herramientas de ingeniería para diseñar, construir y hacer gestión de pavimentos. Dicho programa desarrolló la ecuación 3, como modelo para el cálculo de la temperatura máxima y la ecuación 4, para la determinación de la temperatura mínima (Mohseni, 1998), (Saleh & Trad, 2011).

$$T_{20mm} = 54.32 + 0.78T_{air} - 0.0025Lat^2 - 15.4Log_{10}(H + 25) \quad (3)$$

Donde, T_{20mm} =Temperatura máxima de diseño a 20 mm de la superficie del pavimento en  C, T_{air} =Temperatura del aire promedio de los siete días de máxima temperatura en el año de la zona del proyecto, Lat = latitud geográfica de la zona del proyecto en grados decimales, H =Espesor de la carpeta asfáltica en mm.

$$T_{mín} = -1.56 + 0.72T_{air} - 0.004Lat^2 + 6.26Log_{10}(H + 25) \quad (4)$$

Donde, $T_{mín}$ =Temperatura mínima de diseño en la superficie del pavimento en  C, T_{air} =Temperatura del aire promedio del día en el año más frío en la zona del proyecto, Lat = latitud geográfica de la zona del proyecto en grados decimales, H =Espesor de la carpeta asfáltica en mm.

Los ensayos de clasificación Superpave para el grado PG del cemento asfáltico son los siguientes:

- Punto de inflamación Cleveland (INV E-709/ASTM D92-02b)
- Pérdida de masa por calentamiento (ASTM D2872-12)
- Viscosidad rotacional a 135  C (INV E-717/ASTM D4402)
- Reómetro de corte dinámico - DSR (INV E-750/ASTM D7175-08)
- Reómetro de viga de flexión – BBR (INV E752/AASHTO T313-08)
- Ensayo de tracción directa – DTT (INV E722/ASTM D6723-12)

Con la prueba de Punto de inflación Cleveland, se determina la temperatura mínima a la que el CA produce llama instantánea al estar en contacto con el fuego de forma directa, así como aquella en donde inicia su combustión. En el ensayo de pérdida de masa por calentamiento se determina la cantidad, en masa, del CA perdido por el envejecimiento del mismo mediante el horno de película delgada (RTFO).

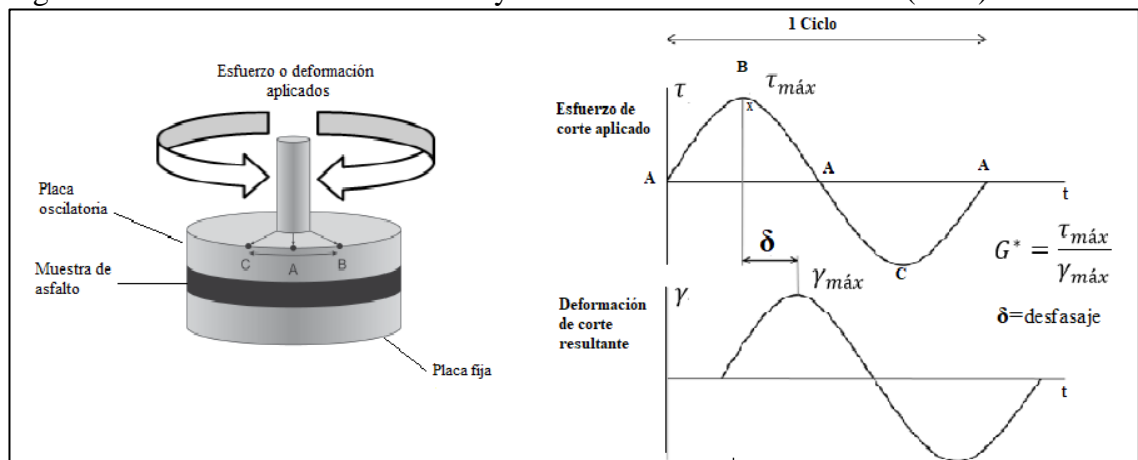
El viscosímetro rotacional evalúa la viscosidad del CA a 135 °C, temperatura alcanzada en las fases de fabricación y construcción, se determina midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico sumergido en la muestra a temperatura constante (Al-Khateeb & Al-Akhras, 2011).

El reómetro de corte dinámico (DSR) se utiliza para caracterizar las propiedades visco elásticas del cemento asfáltico para medias y altas temperaturas. Este ensayo mide el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ), sometiendo el asfalto a tensiones de corte oscilantes colocando la muestra entre dos platos paralelos, figura 10. Este ensayo evalúa la capacidad del CA para resistir deformaciones permanentes. Los parámetros G^* y δ se determinan la someter la muestra de CA a un torque y midiendo la respuesta de la deformación específica de corte del espécimen. La respuesta, está desfasada un cierto intervalo de tiempo (Δt) con relación a la tensión aplicada. El desfase es entregado en medidas angulares, multiplicando el retaso de tiempo (Δt) por la frecuencia angular (ω) para obtener el ángulo de fase (δ) (Asphalt Institute, 2012). En un análisis mecánico G^* es la relación entre el máximo esfuerzo cortante ($\tau_{m\acute{a}x}$) y la máxima deformación por corte ($\gamma_{m\acute{a}x}$). El tiempo de desfase entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante es el ángulo de fase δ (Warren et al., 1994).

Los materiales visco elásticos como los cementos asfálticos tienen un ángulo de fase que va de 0° y 90°, dependiendo de la temperatura del ensayo. A altas temperaturas, el valor de δ está cerca de 90°; a bajas temperaturas δ se aproxima a 0°. Las especificaciones utilizan, como medio para controlar la rigidez del CA, tanto la relación $G^*/\text{sen}\delta$ a altas temperaturas (> 46 °C) como $G^*\text{sen}\delta$ a temperaturas intermedias (entre 7 °C y 34 °C) (R. B. McGennis et al., 1995), (Bianchetto et al., 2011).

El parámetro $G^*/\text{sen}\delta$ representa una medida de la rigidez del CA a altas temperaturas, así como también la resistencia a las deformaciones permanentes (ahuellamiento), este parámetro se determina en el CA original. El parámetro $G^*\text{sen}\delta$ representa una medida de la resistencia al agrietamiento por fatiga, el cual se determina en el CA envejecido para simular las condiciones de envejecimiento en un pavimento en servicio.

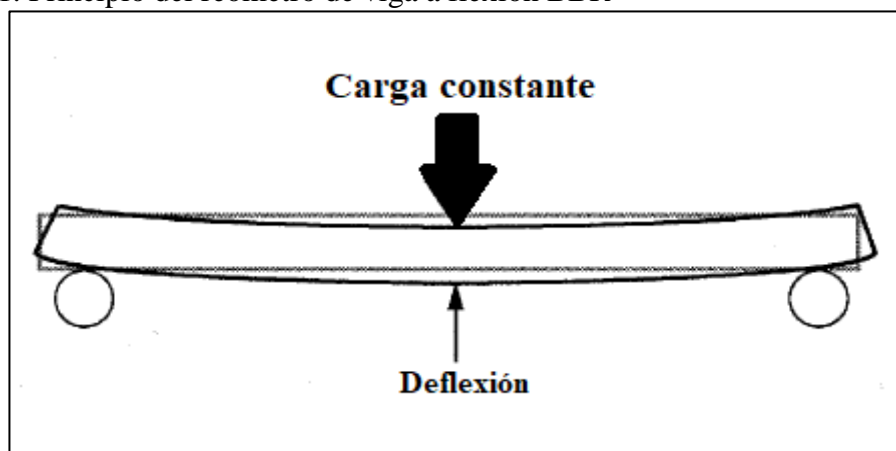
Figura 10. Análisis mecánico del ensayo Reómetro de corte dinámico (DSR)



Fuente: McGennis, Shuler, & Bahia, 1994.

El reómetro de viga de flexión (BBR) determina las propiedades de rigidez del CA a bajas temperaturas, que previamente ha sido envejecido en el horno PAV. Este ensayo mide la rigidez en “*creep*” (S) (*creep*=deformación por fluencia lenta) y el logaritmo de la velocidad de deformación (m). Para obtener estas propiedades se mide la respuesta de una probeta de CA, en forma de viga pequeña, la cual es sometida a una carga constante (R. B. McGennis et al., 1994). El principio de funcionamiento se muestra en la figura 11, los CA con un bajo valor de rigidez S no se fisurarán en tiempos de clima frío y aquellos con altos valores de m son mejores en la relajación de tensiones presentes en la estructura del pavimento cuando la temperatura desciende, asegurando un mínimo de fisuras debido a bajas temperaturas (G. Xu et al., 2017), (Portugal et al., 2017).

Figura 11. Principio del reómetro de viga a flexión BBR



Fuente: McGennis et al., 1994

El ensayo de tracción directa (DDT) entrega la deformación específica de falla (rotura) en tracción, la cual es medida sobre una pequeña muestra con forma de “hueso de perro”, que es estirada a bajas temperaturas hasta que se corta. Al igual que el BBR, el DDT asegura, para una baja temperatura, la máxima resistencia del CA al agrietamiento. La muestra de CA se estira a un ritmo constante y lento hasta que se rompe (falla). La cantidad de elongación hasta la falla se utiliza para calcular la deformación hasta la falla, que es un indicativo si el CA es frágil o dúctil a la temperatura de prueba (R. B. McGennis et al., 1994), (Warren et al., 1994). La figura 12 muestra el principio del ensayo de tracción directa. La tensión de falla es igual al cambio en la longitud, expresada como un porcentaje de la longitud inicial.

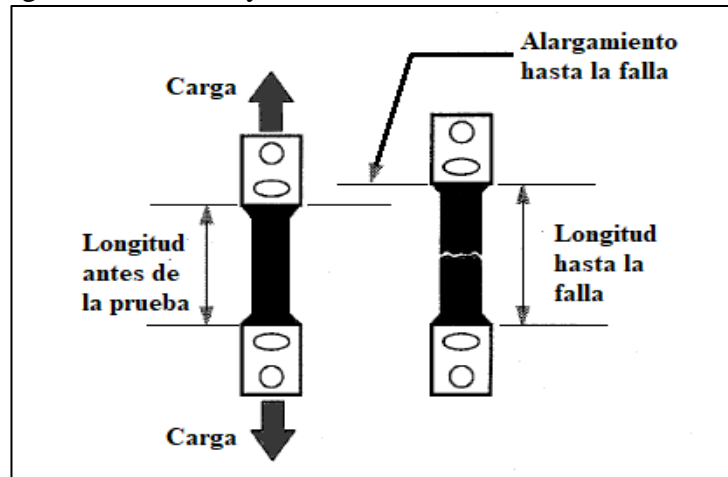
2.5 MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas son diseñadas en base a la experimentación y calibración mediante procedimientos netamente empíricos desarrollados en laboratorio. Para el diseño de la mezcla asfáltica se debe partir de unos procesos previos, los cuales comienzan desde la caracterización de los materiales (agregados y CA), hasta la determinación de las proporciones óptimas de cada uno de ellos. También es necesario la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del

pavimento (Garnica Amguas et al., 2005). De estos componentes depende el comportamiento y desempeño de la mezcla puesta en obra.

Existen métodos muy conocidos como el Marshall o Superpave y otros menos conocidos, pero que han dado buenos resultados, como lo es Ramcodes. En algunos países adaptan alguno de los anteriores de acuerdo a las condiciones propias, como por ejemplo México, que adaptó la metodología Superpave y lo llamó Protocolo AMAAC.

Figura 12. Configuración del ensayo de tracción directa DDT



Fuente: McGennis et al., 1994.

Todos los métodos buscan determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico y la granulometría adecuada para que la mezcla funcione satisfactoriamente, en especial con respecto a la estabilidad y durabilidad (Jitsangiam et al., 2013). Una mezcla preparada en laboratorio se analiza para simular su posible desempeño puesta en servicio. El análisis inicial está enfocado hacia cuatro características y la influencia que estas puedan tener en el desempeño. Las cuatro características son: densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y contenido óptimo de cemento asfáltico.

La densidad de compactación en campo, es una de las características que afectan la durabilidad del pavimento, ya que si la densidad al final de la compactación no es la adecuada, puede conducir a fallas tempranas del pavimento (Leng et al., 2018). Si la compactación es deficiente y la densidad no es cercana a la densidad en laboratorio, puede haber riesgo de oxidación y envejecimiento prematuro (Caro et al., 2014) o daño por humedad (S. Xu et al., 2017) y en caso contrario que ocurra sobre compactación se puede presentar ahuellamiento o exudación (Leng et al., 2012).

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla compactada. Es necesario que la mezcla contenga cierto porcentaje para permitir alguna compactación adicional producida por el tránsito. La densidad y el contenido de vacíos con aire están directamente relacionados (J. Hu et al., 2016). Una mezcla con alto porcentaje de vacíos con aire, puede permitir la entrada de

agua y aire, con esto acelerar el deterioro. Un bajo porcentaje de vacíos de aire puede producir exudación.

Los vacíos en el agregado mineral son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. De acuerdo a la especificación, existen valores mínimos, los cuales están recomendados en función del tamaño del agregado. La cantidad de asfalto con la que se fabrica la mezcla es importante y será determinada muy bien en laboratorio y controlada durante el proceso de fabricación en planta, la determinación del contenido óptimo de asfalto estará sometido a los criterios del método seleccionado.

2.5.1 Método de diseño Marshall. Metodología formulada por Bruce Marshall, ingeniero del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi ([Garnica Amguas et al., 2005](#)), la cual el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos mejoró e incorporó algunos aspectos al procedimiento de prueba y desarrolló un criterio de diseño de mezclas asfálticas. A continuación, se presenta una descripción general. El procedimiento completo se encuentra en la norma AASHTO T245 ([AASHTO, 1997](#))

Las probetas o especímenes elaborados para la prueba estándar son de 64 mm (2.5 Pulg.) de altura y 102 mm (4.0 Pulg.) de diámetro, las cuales son compactadas mediante golpes (impacto) con el martillo Marshall, el número de golpes por cada cara, depende del tránsito para el cual está siendo diseñada. Es necesario hacer tres probetas por cada contenido de asfalto y se recomienda trabajar con mínimo cinco contenidos diferentes, para un total de 15 briquetas para el ensayo. Los aspectos principales de este método son el análisis de densidad y vacíos como la prueba de estabilidad y flujo. Para conocer las características volumétricas y las propiedades mecánicas se realizan tres tipos de pruebas, las cuales se describen a continuación.

2.5.1.1 Determinación de la gravedad específica. La prueba de gravedad específica se realiza a cada probeta compactada tan pronto se haya enfriado. Esta prueba se lleva a cabo de acuerdo a la norma INV E-734/ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o INV E-733/ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficie saturada de briquetas secas.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2% se realiza con el procedimiento utilizando parafina.

2.5.1.2 Prueba de estabilidad y flujo ([Gamica et al., 2004](#)). Después de que se ha determinado la gravedad específica, se realiza la prueba de estabilidad y flujo, para lo cual hay que sumergir las probetas en un baño maría a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Se saca cada probeta del baño maría, se seca y se coloca en la prensa Marshall. Posteriormente se aplica la carga de prueba a una deformación constante de 5 pulgada por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga

máxima obtenida. La carga en Newton requerida para producir la falla de la probeta se registrará como el valor de estabilidad Marshall. El valor de flujo será la deformación en milímetros que sufre la probeta en el momento de la falla.

2.5.1.3 Análisis de densidad y vacíos ([Gamica et al., 2004](#)). Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba.

Es necesario determinar la gravedad específica teórica máxima (INV E-735/ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferiblemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA). También se calcula la relación llenante/ligante y la relación estabilidad/flujo.

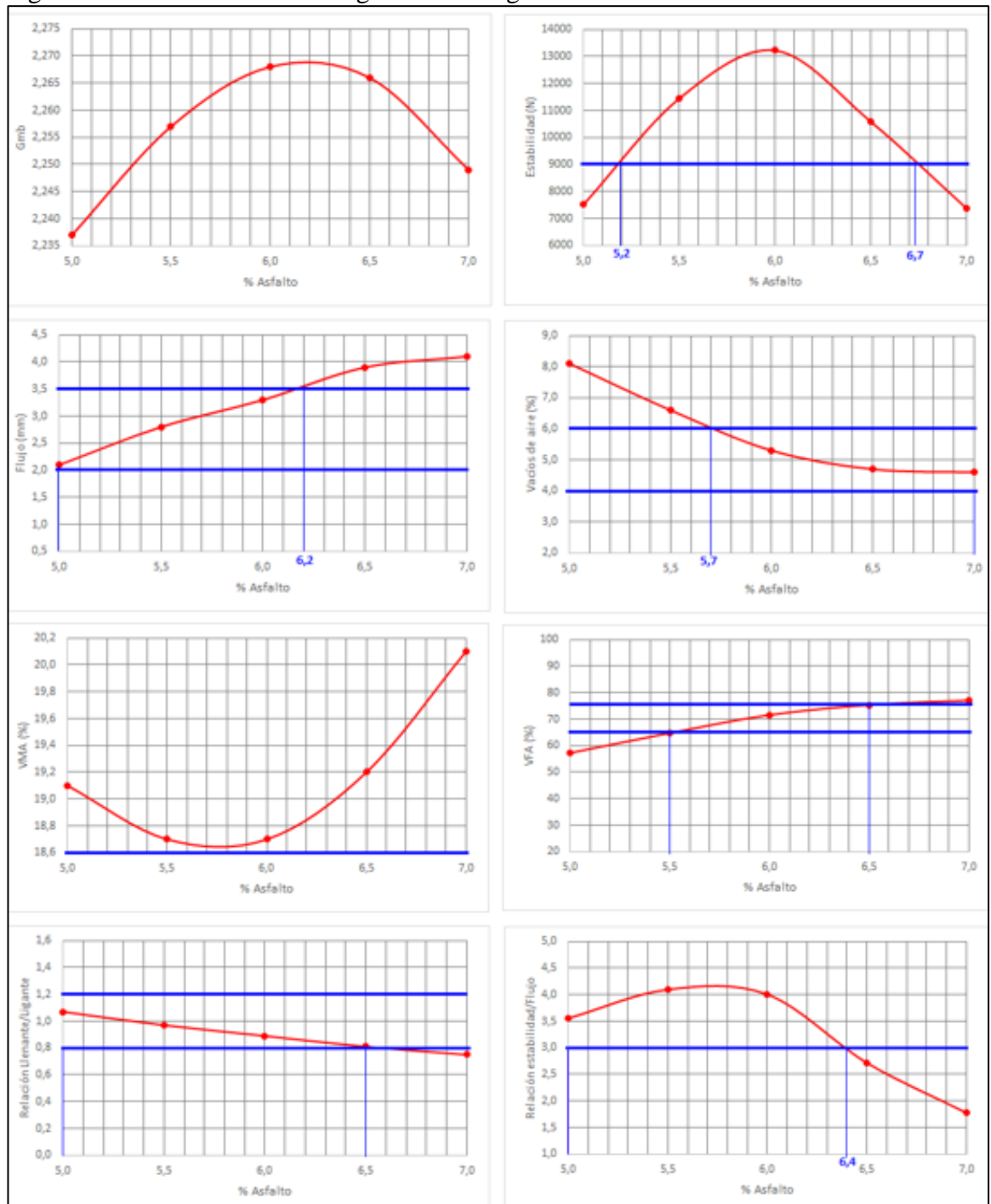
2.5.1.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto. Una vez realizado el cálculo de todos los parámetros mencionados anteriormente, se procede a la realización de las gráficas de: densidad, estabilidad, flujo, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto, relación llenante/ligante y relación estabilidad/flujo. Todas las gráficas en relación con el porcentaje de asfalto.

De acuerdo a [Roberts et al \(1996\)](#), el procedimiento NAPA para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto y con ayuda de las gráficas, incluye los siguientes pasos: Primero, determinar el contenido de asfalto correspondiente a la media especificada del contenido de vacíos de aire (4% normalmente), este es el óptimo contenido de asfalto. Segundo, determinar las propiedades con el óptimo contenido de asfalto de las gráficas de estabilidad, flujo, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. Tercero, comparar cada uno de estos valores y si todos tienen el rango de las especificaciones, entonces el óptimo contenido de asfalto determinado es satisfactorio. Si alguna de estas propiedades está por fuera del rango de especificaciones, la mezcla debe ser rediseñada.

Si se tiene en cuenta el método del Instituto del Asfalto ([Asphalt Institute, 1993](#)), el contenido óptimo de asfalto se determina con ayuda de las gráficas y de acuerdo a los siguientes pasos: primero, determinar los contenidos de asfalto para la estabilidad máxima, la densidad máxima y para el punto medio de rango de vacíos de aire especificado (4% normalmente); promediar los tres valores obtenidos. Segundo, Para el promedio del contenido de asfalto del paso anterior, determine en las gráficas la estabilidad, el flujo, los vacíos en el agregado mineral y los vacíos llenos de asfalto. Tercero, comparar los valores del paso anterior con los criterios de aceptación de acuerdo a las especificaciones; si todos cumplen entonces el contenido óptimo determinado es satisfactorio y si alguno está por fuera del rango, la mezcla será rediseñada.

La propuesta de Pérez (2017), para determinar el contenido óptimo de asfalto se basa en tener en cuenta todos los parámetros exigidos en las especificaciones y las gráficas para diseño. Lo cual se resume en los siguientes pasos: primero, en cada una de las gráficas determinar el rango de porcentaje de asfalto en el cual se cumple las especificaciones, figura 13; segundo, elaborar un cuadro resumen, figura 14, para visualizar el rango de trabajo y seleccionar el óptimo de asfalto.

Figura 13. Gráficas de diseño según metodología Marshall.



Fuente: el autor, con base a Pérez, 2017.

Figura 14. Resumen para determinar el óptimo de asfalto.

Mezcla diseño	Especif.	% Asfalto																		Rango de trabajo			
		5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7		6,8	6,9	7,0
Densidad (Gmb)	-																						-
Estabilidad (N)	> 9000																						5,2 - 6,7
Flujo (mm)	2,0 - 3,5																						5,0 - 6,2
Vacíos con aire, Va (%)	4,0 - 6,0																						5,7 - 7,0
VAM (%)	> 15																						5,0 - 7,0
VFA (%)	65 - 75																						5,5 - 6,5
Relación: Llenante/Ligante	0,8 - 1,2																						5,0 - 6,5
Relación: Estab./Flujo	3,0 - 6,0																						5,0 - 6,4

■ No cumple la especificación
■ Si cumple la especificación
■ Zona donde cumple simultáneamente las especificaciones
■ Porcentaje óptimo de asfalto seleccionado

Fuente: El autor, con base a Pérez, 2017.

Las figuras 13 y 14 están hechas con base en las especificaciones colombianas (Art. 450-13 del INVIAS) para una mezcla MDC-19 y teniendo en cuenta un nivel de tránsito de diseño NT-3.

En Colombia, el diseño de una mezcla asfáltica en caliente y de granulometría continua se realiza con la metodología Marshall teniendo en cuenta los siguientes pasos: Primero, determinar las propiedades volumétricas y realizar el ensayo de estabilidad y flujo es denominado diseño preliminar, en el cual se determina el porcentaje óptimo de asfalto. Segundo, Si el diseño preliminar cumple los requisitos de las especificaciones, se realiza la verificación del diseño preliminar, el cual incluye la realización de los ensayos de susceptibilidad a la humedad (INV E-725), resistencia a la deformación plástica (INV E-756), módulo resiliente (INV E-749) y determinación de las leyes de fatiga (INV E-784) (INVIAS, 2013b).

2.5.2 Metodología Superpave. Superpave es el producto del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP, por su sigla en inglés), el cual es un sistema de especificaciones estándar, métodos de prueba y prácticas de ingeniería que permiten la selección adecuada de materiales y el diseño de mezclas asfálticas en caliente para cumplir con las condiciones climáticas y de tránsito de proyectos específicos (Transportation Research Board, 2005).

El método de diseño de mezclas asfálticas establecido por Superpave es un diseño del tipo volumétrico, el cual se basa en determinar el contenido óptimo de asfalto tal que la mezcla alcance un 96% de la densidad teórica máxima (Gmm), es decir 4% de vacíos de aire, después de la compactación. La mezcla con el contenido óptimo de asfalto debe cumplir con todos los parámetros volumétricos y con las especificaciones relacionadas con los ensayos de predicción del comportamiento, dependiendo del nivel de diseño basado en el nivel de tránsito (R. McGennis et al., 2012). Los niveles de diseño se muestran en la tabla 6.

El primer nivel requiere el diseño volumétrico de la mezcla, el cual incluye los siguientes aspectos: selección del tipo de cemento asfáltico, selección de las propiedades del agregado, preparación de los especímenes de ensayo y selección del contenido óptimo de asfalto. Esta última actividad se trata de la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla como: Contenido de vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto y la relación polvo/contenido de asfalto efectivo. El segundo nivel utiliza como punto de partida el análisis volumétrico del primer nivel y los ensayos establecidos para la predicción del comportamiento son: ensayo de corte (SST, Superpave Shear Test) y el ensayo de tensión indirecta (IDT, Indirect Tensile Test), estos ensayos permiten la aceptación o rechazo de la mezcla. El tercer nivel incluye la totalidad de los pasos realizados en los niveles anteriores, pero se realizan ensayos adicionales IDT a una variedad de temperaturas.

Tabla 6. Niveles de diseño de la metodología Superpave.

Tránsito (ESAL's)	Nivel de diseño	Requerimiento de ensayo ¹
$ESAL's < 10^6$	1er Nivel Análisis Básico	Diseño volumétrico
$10^6 < ESAL's < 10^7$	2do Nivel Análisis Intermedio	Diseño volumétrico + pruebas de predicción del comportamiento
$10^7 < ESAL's$	3er Nivel Análisis Avanzado	Diseño volumétrico + prueba de predicción del comportamiento + pruebas adicionales

ESAL's: Número total de ejes simples equivalentes

¹ En todos los casos, la susceptibilidad a la humedad debe ser evaluada usando la norma correspondiente.

Fuente: [R. McGennis et al., 2012](#)

Las probetas o especímenes elaborados para la prueba son de 115 mm (4.5 Pulg.) de altura y 150 mm (6.0 Pulg.) de diámetro, las cuales son compactadas mediante compactador giratorio, el cual efectúa una rotación con un ángulo de inclinación de 1.25 grados y ejerciendo una presión de confinamiento a la misma. Estos efectos simulan mejor el efecto producido por los rodillos compactadores sobre el pavimento. Otra novedad es el acondicionamiento de la mezcla para el ensayo, el cual consiste dejar la mezcla en el horno durante cuatro horas a 135° C, antes de la compactación ([R. M. Anderson & McGennis, 1995](#)). Este acondicionamiento simula el envejecimiento que sufre la mezcla durante su elaboración en planta y transporte hasta la obra ([Leandro et al., 2017](#)).

A continuación, se describen los pasos que se deben seguir en el diseño de la mezcla asfáltica.

2.5.2.1 Selección de la granulometría. La selección granulométrica busca encontrar la mejor dosificación que cumpla con los requisitos establecidos en las especificaciones. Para esto, se realizan varias combinaciones de acuerdo a las granulometrías individuales de los materiales. Se recomienda mínimo tres mezclas de prueba, las cuales deben compararse con los requerimientos Superpave (puntos de control) de acuerdo a la mezcla especificada para el proyecto.

Una vez seleccionadas las mezclas de prueba se calculan las propiedades de los agregados a partir de las propiedades individuales, con el fin de corroborar que las mezclas cumplan

con los requerimientos. El porcentaje de asfalto para preparar cada mezcla de prueba se determina estimando la gravedad específica efectiva de la mezcla (G_{se}), el volumen de asfalto (V_{ba}) y el volumen de asfalto efectivo (V_{be}) con las ecuaciones 5, 6 y 7 (Harman et al., 2002).

$$G_{se\ est} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb}) \quad (5)$$

$$V_{ba\ est} = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se\ est}}} * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se\ est}} \right) \quad (6)$$

$$V_{be\ est} = 0.0081 - 0.02931 * [\ln(S_n)] \quad (7)$$

Donde, $G_{se\ est}$ =Gravedad específica efectiva estimada, G_{sb} =gravedad específica bulk de la combinación de agregados, G_{sa} =gravedad específica aparente de la combinación de agregados, $V_{ba\ est}$ = Volumen de asfalto estimado, P_s = Porcentaje de agregado (95%), V_a = vacíos de aire (4%), P_b =porcentaje de asfalto (supuesto, 5%), G_b =gravedad específica del asfalto, $V_{be\ est}$ = Volumen de asfalto efectivo estimado, S_n =tamaño máximo nominal de la mezcla (en pulgadas).

Finalmente, el contenido de asfalto inicial para cada mezcla de prueba se calcula con ayuda de la ecuación 8.

$$P_{bi} = \frac{G_b * (V_{be\ est} + V_{ba\ est})}{G_b * (V_{be\ est} + V_{ba\ est}) + W_s} * 100 \quad (8)$$

Donde, P_{bi} = porcentaje de asfalto para cada mezcla de prueba, W_s =Peso del agregado (en gramos).

Después de calculado el porcentaje de asfalto inicial, se compactan con el compactador giratorio (SGS) un mínimo de 2 especímenes por cada mezcla de prueba. También, se preparan otros dos especímenes para determinar la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}).

Un aspecto importante en este paso es el número de giros de diseño ($N_{diseño}$), el cual está en función del tránsito de diseño. Las propiedades volumétricas del espécimen serán diferentes con respecto al número de giros que se emplee en la compactación. En la tabla 7, se muestran los requerimientos de compactación Superpave (Asphalt Institute, 2001).

Tabla 7. Requerimientos de compactación Superpave

ESAL's de diseño (millones)	Esfuerzos del compactador giratorio Superpave		
	Parámetros de compactación		
	N inicial	N diseño	N máximo
< 0.3	6	50	75
0.2 a < 3.0	7	75	115
3.0 a < 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Fuente: Asphalt Institute SP-2, 2001

Concluida la compactación de los especímenes elaborados con las mezclas de prueba es necesario evaluar las propiedades volumétricas requeridas por Superpave. Una vez evaluados, se mira cuál de las mezclas de prueba alcanzó el 4% de vacíos de aire. En el caso de que alguna cumpla con este criterio, esta será la granulometría aprobada para seguir con el diseño de la mezcla. En caso contrario, se calcula para cada muestra de prueba el contenido de asfalto estimado para alcanzar el 4% de vacíos de aire con ayuda de la ecuación 9.

$$P_{bestim} = P_{bi} - [0.4 * (4 - V_a)] \quad (9)$$

Donde, P_{bestim} =porcentaje de asfalto estimado, P_{bi} =porcentaje de asfalto inicial para cada mezcla de prueba, V_a =porcentaje de vacíos obtenido para cada mezcla de prueba.

Con cada porcentaje de asfalto calculado (P_{bestim}) se estiman las propiedades volumétricas (VAM y VFA) para la compactación de diseño con las ecuaciones 10 y 11.

$$VAM_{estim} = VAM_{inicial} + C * (4 - V_a) \quad (10)$$

$$VFA_{estim} = 100 * \left[\frac{VAM_{estim} - 4}{VAM_{estim}} \right] \quad (11)$$

Donde, $VAM_{inicial}$ =VAM para el contenido de asfalto de prueba, C = constante (0.1 si $V_a < 4\%$; 0.2 si $V_a > 4\%$).

Las propiedades estimadas se comparan con los criterios de las especificaciones para la mezcla que se está diseñando, se analizan los valores y se determina la mezcla que más se ajusta a los requerimientos. Posteriormente, se escoge la estructura de agregados adecuada para continuar con el diseño y el contenido de asfalto inicial para diseño.

2.5.2.2 Determinación del contenido óptimo de asfalto. Una vez seleccionada la estructura de agregado de diseño se compactan especímenes, al número de giros de diseño, con diferentes contenidos de asfalto. Un mínimo de dos especímenes es compactado para cada uno de los siguientes contenidos de asfalto: contenido de asfalto inicial, contenido de asfalto inicial $\pm 0.5\%$ y contenido de asfalto inicial + 1.0%, para un resultado total de cuatro contenidos de asfalto (Harman et al., 2002), (R. B. McGennis et al., 1995), (R. M. Anderson & McGennis, 1995).

Posteriormente, se calculan las propiedades volumétricas de cada una de las mezclas. A partir de estos puntos de datos, se recomienda generar gráficas de V_a , VMA y VFA contra el contenido de asfalto y mediante interpolación establecer el contenido de asfalto que satisfaga el 4% de vacíos de aire. Dicho contenido de asfalto será el contenido óptimo, a partir del cual se determinarán los demás parámetros estipulados en las especificaciones para la mezcla que se esté diseñando.

2.5.2.3 Verificación del comportamiento de la mezcla. Como etapa final del diseño, es necesario verificar el comportamiento de la mezcla, realizando los ensayos de acuerdo al nivel de diseño (tabla 6).

2.5.3 Diseño de mezclas asfálticas protocolo AMAAC. La Asociación Mexicana del Asfalto A.C., presentó la metodología para diseñar mezclas asfálticas de alto desempeño para la construcción de pavimentos para carreteras ([Asociación Mexicana del Asfalto AC, 2013](#)), basada fundamentalmente en la metodología Superpave. Adicionalmente, incluye un gran número de ensayos para caracterizar el cemento asfáltico, el agregado pétreo y la estructura de diseño de dicho agregado (Vanegas Solís, 2013). Al igual que la metodología Superpave, la recomendación para seleccionar el nivel de diseño se basa en el tránsito y/o el tipo de proyecto. Los niveles de diseño definidos en el protocolo AMAAC difieren de los niveles de Superpave ([Villafuerte Pérez, 2018](#)). En la tabla 8, se muestra los niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes y/o el tipo de proyecto.

Tabla 8. Niveles de diseño protocolo AMAAC.

Designación del Nivel de Tránsito	Números de ejes equivalentes	Tipos de Carreteras usuales	Ensayos recomendados
Nivel I Tránsito bajo	< 1.000.000	-Carreteras alimentadoras -Carreteras tipo D -Carreteras municipales -Calles urbanas	-Diseño volumétrico -Susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	De 1.000.000 a 10.000.000	-Carreteras estatales -Carreteras tipo B y C Vías urbanas	-Diseño volumétrico - Susceptibilidad a la humedad -Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Transito alto	De 10.000.000 a 30.000.000	-Carreteras tipo A -Autopistas	-Diseño volumétrico - Susceptibilidad a la humedad -Susceptibilidad a la deformación permanente -Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	> 30.000.000	-Carreteras troncales -Autopistas de cuota importantes -Vías suburbanas en ciudades muy grandes	-Diseño volumétrico - Susceptibilidad a la humedad -Susceptibilidad a la deformación permanente -Módulo dinámico - Fatiga

Fuente: [Asociación Mexicana del Asfalto AC, 2013](#)

2.5.4 Metodología Ramcodes. Esta metodología fue desarrollada por el ingeniero Freddy José Sánchez Leal en el año 1998. Ramcodes es un acrónimo de RAtional Methodology for COmpacted geomaterial`s DEnsity and Strength analysis, que significa, Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados. Metodología que ha sido aplicada exitosamente en el diseño y control de calidad de suelos compactados para rellenos estructurales y carreteras, así como para el diseño y control de producción de concretos asfálticos. En el caso de los concretos asfálticos, Ramcodes cuenta con dos herramientas de análisis, como son la carta de gradación ([Sánchez-Leal, 2007](#)) y el polígono de vacíos ([Sánchez-Leal et al., 2011](#)).

La carta de gradación es un ambiente analítico en el que se pueden representar de forma simultánea una o más granulometrías de concretos asfálticos, a las que se le pueden asociar respuestas mecánicas, hidráulicas o costos de producción, lo que permite de forma

notoria la optimización del uso de materiales en la producción de concretos asfálticos para pavimentos. Por otra parte, el polígono de vacíos es una construcción gráfica completamente automatizada que permite obtener un contenido óptimo de cemento asfáltico basado en las especificaciones de vacíos, en las gravedades específicas de los agregados y del cemento asfáltico. El resultado de la mezcla de los agregados seleccionados con el contenido óptimo de cemento asfáltico obtenido con el polígono de vacíos es verificable con la elaboración y ensayo de tres briquetas o especímenes, en vez de quince o doce, con los procedimientos de los métodos Marshall o Superpave, respectivamente. El polígono de vacíos produce con tres especímenes el mismo resultado que con Marshall o Superpave, con lo que es posible evaluar entre cuatro o cinco combinaciones diferentes de agregados con los mismos recursos y tiempo que se evaluaría una sola combinación empleando las metodologías referidas anteriormente. Lo anterior tiene grandes ventajas para la investigación científica.

2.5.4.1 Carta de gradación. La carta de gradación es una construcción gráfica cartesiana que se forma a partir de los parámetros de ajuste del modelo Fuller ([Asphalt Institute, 1992](#)), muy utilizado en mezclas asfálticas para ajustar gradaciones continuas y con proporción de pasa tamiz No. 200 inferiores a 10%. Con esto, cualquier curva granulométrica se representa por un punto y la banda de especificaciones se representa como un rectángulo, lo que facilita el análisis de varias granulometrías simultáneamente ([Sánchez-Leal, 2011](#)).

El modelo Fuller viene dado por la ecuación 12.

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n \quad (12)$$

Donde, D_i = Cualquier tamaño de tamiz, $D_{m\acute{a}x}$ = tamaño máximo del agregado, n =factor o coeficiente de forma. p_i = porcentaje que pasa por el tamiz considerado i .

Con ayuda de un procedimiento matemático de iteración, se pueden determinar los valores de $D_{m\acute{a}x}$ y n para que el coeficiente de ajuste R^2 sea superior a 0.97, que es la condición experimental para considerar que el modelo es satisfactorio. R^2 es la proporción de la variación observada en los porcentajes que pasa de los tamices (P_i) que puede ser explicada por el modelo. Un valor de $R^2=0$ significa que el modelo no representa los datos. De otra forma, $R^2=1$ indica que el modelo representa de una manera adecuada los datos ([Sánchez-Leal, 2009](#)). El coeficiente R^2 se define en la ecuación 13.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \left(P_i - \left(\frac{D_i}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n \right)^2}{\sum P_i^2 - \frac{(\sum P_i)^2}{N}} \quad (13)$$

Donde, N = número de tamices considerado, P_i =porcentaje pasante observado a través de D_i .

Los agregados utilizados en la fabricación de concretos asfálticos se pueden clasificar como: agregado grueso (grava) que es el material retenido en el tamiz No 4 (4.75 mm),

agregado intermedio (arena) que es el material que pasa por el tamiz No 4 (4.75 mm) y es retenido en el tamiz No 200 (0.075 mm) y agregado fino (llenante) que es el material que pasa el tamiz No 200 (0.075 mm) (Sánchez-Leal, 2018). Si el agregado se ajusta al modelo Fuller, se puede determinar una ecuación matemática para determinar si el agregado es grava (G) o arena (S). El contenido de grava puede ser expresado con la ecuación 14, el contenido de llenante con la ecuación 15 y el de arena con la ecuación 16 (Sánchez-Leal, 2007).

$$G = 1 - p_{4.75} \quad (14)$$

$$F = p_{0.075} \quad (15)$$

$$S = 1 - (1 - p_{4.75}) - p_{0.075} = p_{4.75} - p_{0.075} \quad (16)$$

En consecuencia, un agregado se considera tipo grava cuando G es mayor que S, y en caso contrario sería arena. La frontera entre grava y arena está dada por G=S, si se igualan las ecuaciones 14 y 16, se expresa en términos del modelo de Fuller y se despeja $D_{m\acute{a}x}$, el resultado es la ecuación 17, la cual define la frontera grava-arena (Sánchez-Leal, 2007).

$$1 - p_{4.75} = p_{4.75} - p_{0.075}$$

$$1 = 2 \left(\frac{4.75}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n - \left(\frac{0.075}{D_{m\acute{a}x}} \right)^n$$

$$D_{m\acute{a}x} = (2 \times 4.75^n - 0.075^n)^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

A partir de los parámetros Fuller de una granulometría, se puede calcular la relación Grava/Arena (G/S), el cual es un parámetro importante en la correlación de la influencia de la gradación en el comportamiento de un concreto asfáltico (Sánchez-Leal, 2007), a través de la ecuación 18.

$$\frac{G}{S} = \frac{D_{m\acute{a}x}^n - 4.75^n}{4.75^n - 0.075^n} \quad (18)$$

Si de la ecuación 18, se despeja el valor de $D_{m\acute{a}x}$, quedará como la ecuación 19.

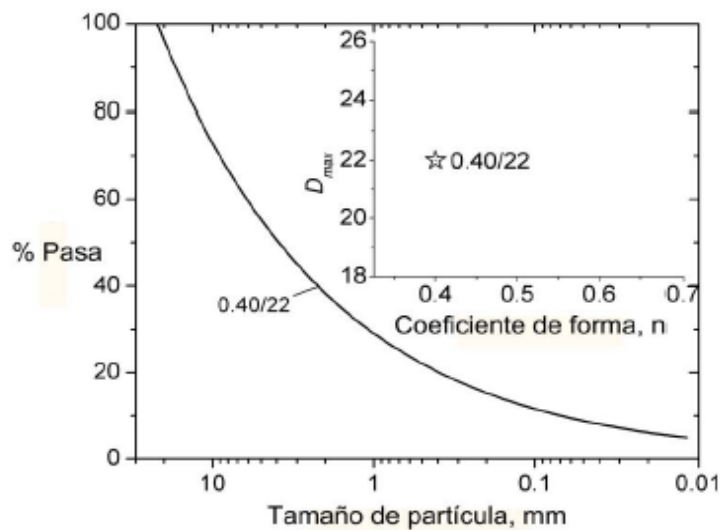
$$D_{m\acute{a}x} = \left[\left(1 + \frac{G}{S} \right) \times 4.75^n - \frac{G}{S} \times 0.075^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (19)$$

La representación de la granulometría, se realiza por medio de un punto, el cual es llamado punto-ámbito por Sánchez-Leal (2009). El cual consiste en la representación de los parámetros del modelo de Fuller en el plano cartesiano, donde el coeficiente de forma (n) se representa en el eje x y $D_{m\acute{a}x}$ en el eje y. Es decir, la curva granulométrica equivale a un punto con coordenadas (n , $D_{m\acute{a}x}$) el cual se escribe como $n/D_{m\acute{a}x}$. De esta manera, el

ejemplo dado por Sánchez-Leal, 0.40/22 significa un ajuste de granulometría con $n=0.40$ y $D_{m\acute{a}x}=22$ mm, como se muestra en la figura 15.

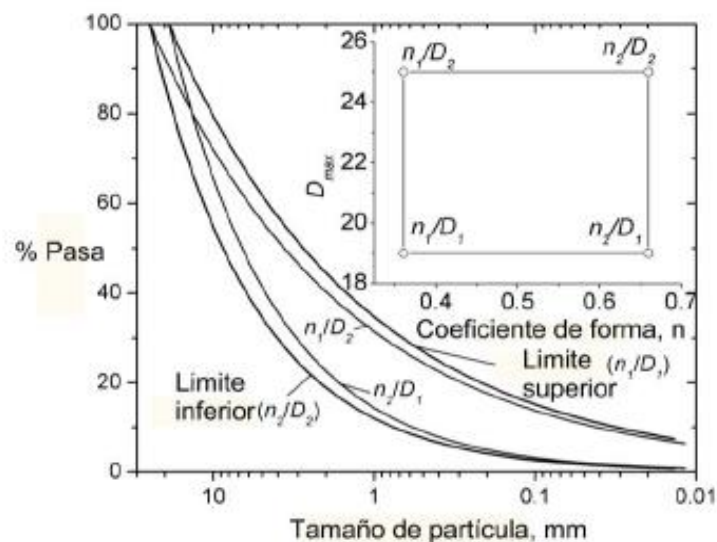
De este modo, la representación tradicional de una franja granulométrica de especificación puede ser expresada en la representación punto-ámbito, como un rectángulo llamado ámbito en la metodología. Para ello, se utiliza la granulometría superior e inferior representada por sus respectivos parámetros n_1/D_1 y n_2/D_2 . Los restantes vértices del rectángulo son n_1/D_2 y n_2/D_1 , para formar el ámbito en que las granulometrías cumplen con la franja de gradación equivalente, en la figura 16, se presenta el ámbito para una franja granulométrica.

Figura 15. Representación punto-ámbito para una granulometría



Fuente: Sánchez-Leal (2007), Sánchez-Leal (2009).

Figura 16. Representación franja granulométrica en especificación punto-ámbito

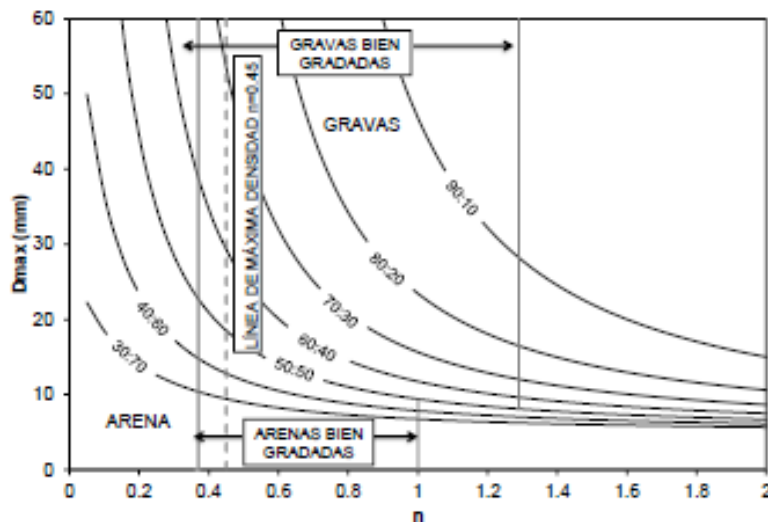


Fuente: Sánchez-Leal (2007), Sánchez-Leal (2009)

En la carta de gradación se pueden presentar las especificaciones para varias granulometrías al mismo tiempo con los contornos para relaciones grava – arena (G/S) y propiedades mecánicas o hidráulicas. La carta de gradación tiene la intención de asociación y predicción de las propiedades de agregados, estos se organizan en una carta de gradación en relación con el tamaño máximo (D_{max}) y la estructura (por medio del factor de forma n), debido a que la gradación es el principal factor inherente que influencia el comportamiento de estos materiales.

La figura 17 muestra la forma general de una carta de gradación, el factor de forma (n) y el diámetro máximo (D_{max}) conforman los ejes x y y respectivamente. Cada contorno implica que existen infinitas combinaciones de n y D_{max} que producen la misma relación G/S .

Figura 17. Forma general de una carta de gradación



Fuente: [Sánchez-Leal \(2007\)](#), [Sánchez-Leal \(2009\)](#)

La curva que se obtiene de la ecuación 17 divide las arenas de las gravas, se incorpora los rangos de coeficiente de forma (C_u) y coeficiente de curvatura (C_c) de ASTM, así como la línea de máxima densidad ($n=0.45$) y con la ecuación 15 los contornos para varias proporciones grava-arena.

2.5.4.2 Polígono de vacíos. El polígono de vacíos es una herramienta analítica para determinar la fórmula de trabajo para cualquier mezcla asfáltica densa en caliente, basado en las especificaciones de vacíos. Inicialmente, el polígono de vacíos se consideró para acelerar el método de diseño Marshall, pero con el tiempo surgieron las aplicaciones de esta técnica para el diseño y análisis de mezclas asfálticas en caliente para Superpave.

Los parámetros de vacíos en una mezcla asfáltica, tanto para Marshall como para Superpave, son: vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA). Los cuales se representan analítica y gráficamente dentro de un plano de densidad contra contenido de asfalto. Para la construcción del polígono de vacíos se

desarrollaron ecuaciones, las cuales permiten determinar el área donde se cumplen simultáneamente todas las especificaciones de vacíos.

Las ecuaciones 20, 21 y 22 tal como las presentan Sánchez-Leal et al. (2011), fueron desarrolladas a partir de la gravedad específica del asfalto (G_b), gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), contenido de asfalto (P_b) y la gravedad específica “bulk” del agregado (G_{sb}) (Sánchez-Leal, 2009).

$$G_{mb} = \frac{(1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{(1 - P_b)}{G_{se}}} \quad (20)$$

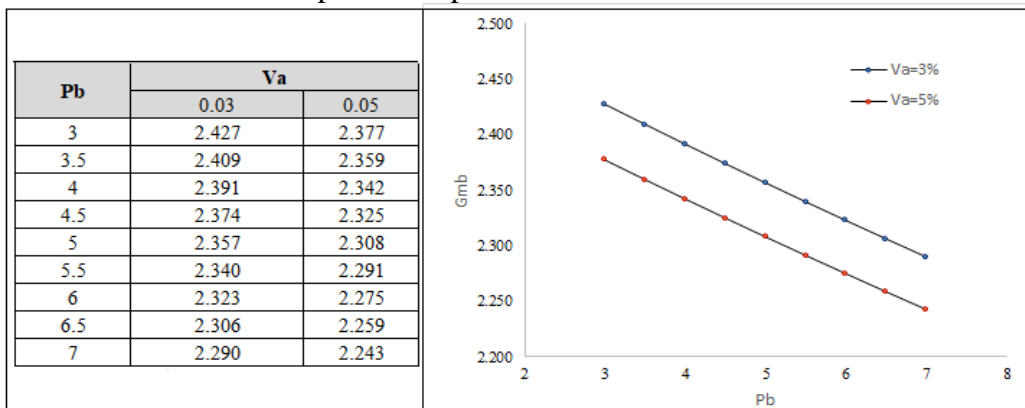
$$G_{mb} = \frac{(1 - VMA)}{(1 - P_b)} G_{sb} \quad (21)$$

$$G_{mb} = \frac{VFA}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{(1 - P_b)}{G_{se}} - (1 - VFA) \frac{(1 - P_b)}{G_{sb}}} \quad (22)$$

Para construir el polígono de vacíos es necesario establecer los criterios de vacíos a cumplir. A manera de ejemplo, se muestra la construcción de un polígono de vacíos para una mezcla asfáltica de acuerdo a 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).

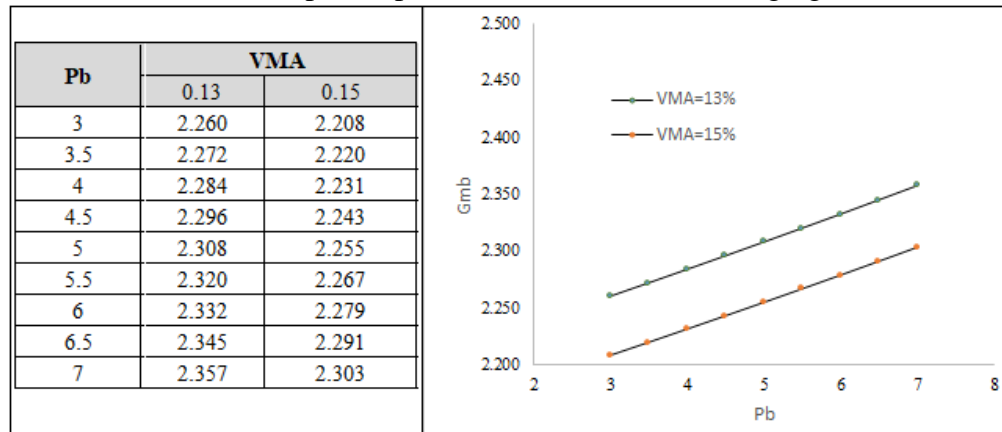
Con la ecuación 20, se varía el valor de contenido de asfalto (P_b), se utilizan los valores de los límites de vacíos con aire (3% y 5%) y se calculan los valores de G_{mb} para cada porcentaje de asfalto. En la figura 18, se muestra los valores y resultados utilizados para graficar las isolíneas. Con la ecuación 21, se determinan los datos para la poder graficar las isolíneas para vacíos en el agregado mineral (VMA), los cual se muestra en la figura 19. De igual forma, con la ecuación 22 se pueden construir las isolíneas para vacíos llenos de asfalto (VFA), tal como se muestra en la figura 20.

Figura 18. Datos e isolíneas para las especificaciones de vacíos de aire



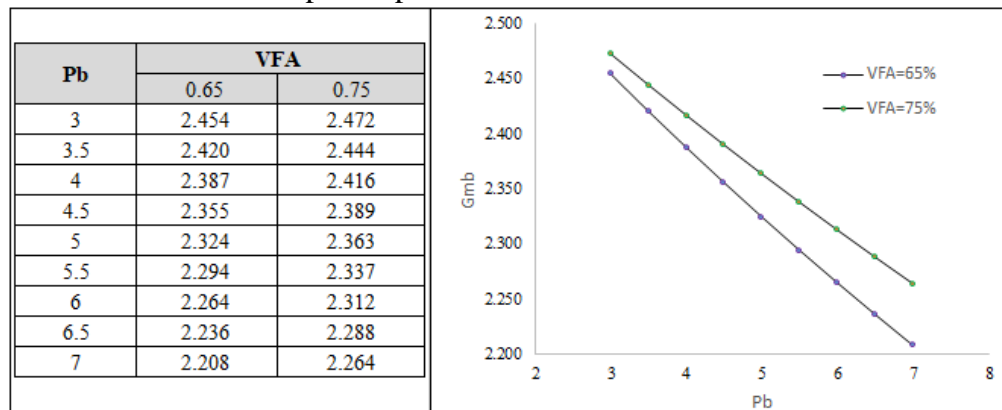
Fuente: El autor, con base en (Sánchez-Leal, 2009).

Figura 19. Datos e isóneas para especificaciones de vacíos en agregado mineral



Fuente: El autor, con base en (Sánchez-Leal, 2009).

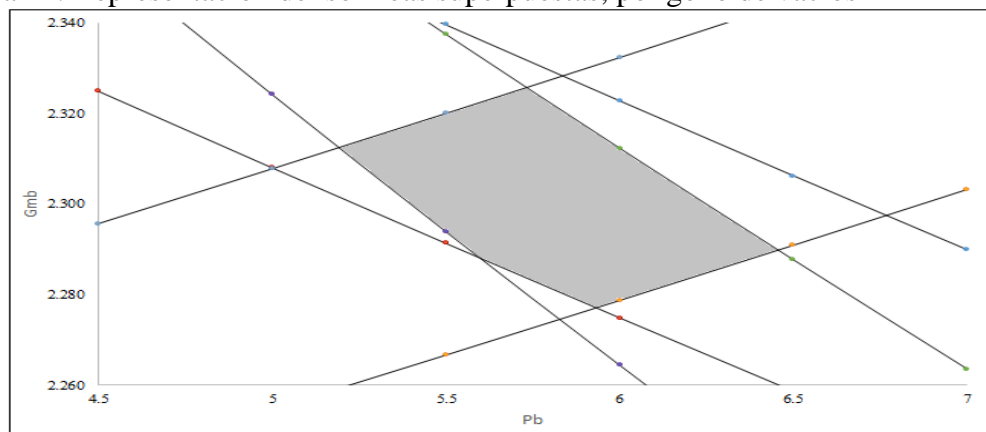
Figura 20. Datos e isóneas para especificaciones de vacíos llenos de asfalto



Fuente: El autor, con base a (Sánchez-Leal, 2009).

Al superponer los tres pares de isóneas se crea el área definida como polígono de vacíos, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Representación de isóneas superpuestas, polígono de vacíos



Fuente: El autor, con base a (Sánchez-Leal, 2009).

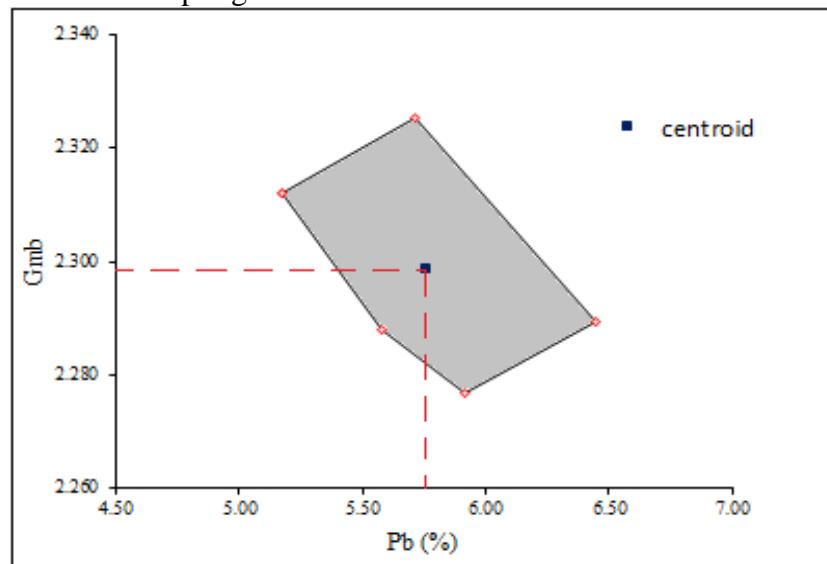
Finalmente, como se enuncio anteriormente, cualquier punto dentro del polígono cumple con las especificaciones de vacíos. Pero el enfoque de Ramcodes necesita proponer un contenido óptimo de asfalto, el cual es el centroide del polígono. Las coordenadas del centroide se calculan como el promedio de las coordenadas de todos los vértices que hacen parte del polígono, el cual viene definido por las ecuaciones 23 y 24.

$$(P_b)_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_b)_i}{n} \quad (23)$$

$$(G_{mb})_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_{mb})_i}{n} \quad (24)$$

Para el ejemplo desarrollado, las coordenadas del centroide son $(P_b)_{prom} = 5.77\%$ y $(G_{mb})_{prom} = 2.298$. Como se puede observar en la figura 22. Todos los cálculos se pueden hacer de una manera muy fácil con una hoja de cálculo.

Figura 22. Centroide del polígono de vacíos



Fuente: el autor, con base a (Sánchez-Leal et al., 2011).

Con la granulometría seleccionada y el contenido de asfalto óptimo teórico obtenido en el polígono de vacíos, queda probar que la mezcla cumpla los requerimientos para los cuales se esté diseñando. [Sánchez-Leal \(2009\)](#) propone los siguientes pasos dentro de la metodología para el diseño de las mezclas asfálticas:

- Se determina la gravedad específica efectiva (G_{se}), la gravedad específica bulk (G_{sb}) y la gravedad específica aparente (G_{sa}) de la combinación de agregados seleccionada. Se verifica que $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ según las definiciones teóricas. 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.
- Continuando con las disposiciones del ensayo, se mezcla la combinación de agregados con el contenido óptimo de asfalto teórico y se compactan tres (3) especímenes bajo la energía o método de compactación seleccionado (Impacto de Marshall o Compactador giratorio de Superpave). Medir los especímenes y determinar los vacíos. Se ensayan para determinar la estabilidad y el flujo de acuerdo a Marshall o ensayo TSR de Superpave. Se promedian los resultados de los tres especímenes.
- Verificar, si el contenido de asfalto y la densidad bulk entran en el polígono de vacíos. Si no cumple, entonces el intento falló. Seleccionar otra combinación de agregados y empezar el procedimiento.
- Verificar, si el promedio de estabilidad y flujo de los tres especímenes cumplen con las especificaciones de acuerdo a Marshall o el promedio del ensayo TSR para Superpave. Si no cumple, el intento falló. Seleccionar otra combinación de agregados y empezar el procedimiento.

Nota: 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 (Sánchez-Leal, 2018).

2.5.5 Relaciones volumétricas y gravimétricas en mezclas asfálticas. En una mezcla asfáltica se tienen tres fases; la fase sólida formada por los agregados, la fase líquida que es el cemento asfáltico y la fase gaseosa que comprende el aire. Debido a que el agregado, que forma parte de la mezcla asfáltica es poroso, un aparte del asfalto es absorbido por los poros del agregado, por tanto, una porción del agregado y del asfalto comparten espacio; a esta porción se le llama asfalto absorbido. La consideración de la absorción del asfalto permite subdividir la fase de volumen del asfalto en volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido; la fase de volumen del agregado, en volumen del agregado total y volumen de agregado efectivo.

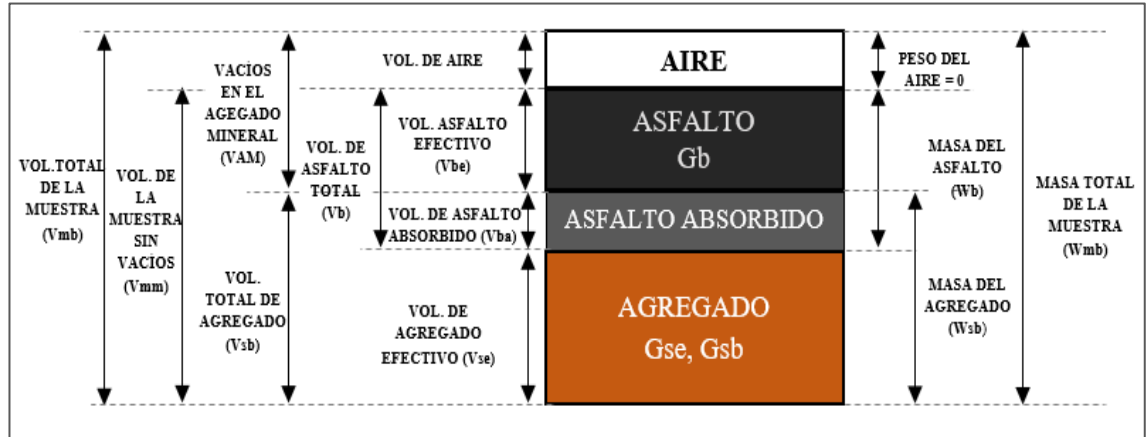
La figura 23 muestra en forma esquemática el diagrama de fases utilizado para describir las propiedades de masa y volumen de una mezcla asfáltica compactada.

2.5.5.1 Relaciones gravimétricas.

-Gravedad específica bulk (neta) del agregado. Se determina midiendo la masa seca y el volumen neto o absoluto de una muestra de agregados de acuerdo a la norma INV E-222-13, INV E-223-13/ASTM C127, ASTM C128. El volumen bruto incluye el volumen del sólido del agregado más el volumen de agua contenida en los poros superficiales o permeables. El volumen neto se mide para la condición del agregado saturado y superficialmente seco. En la figura 24 se muestra en forma esquemática el concepto.

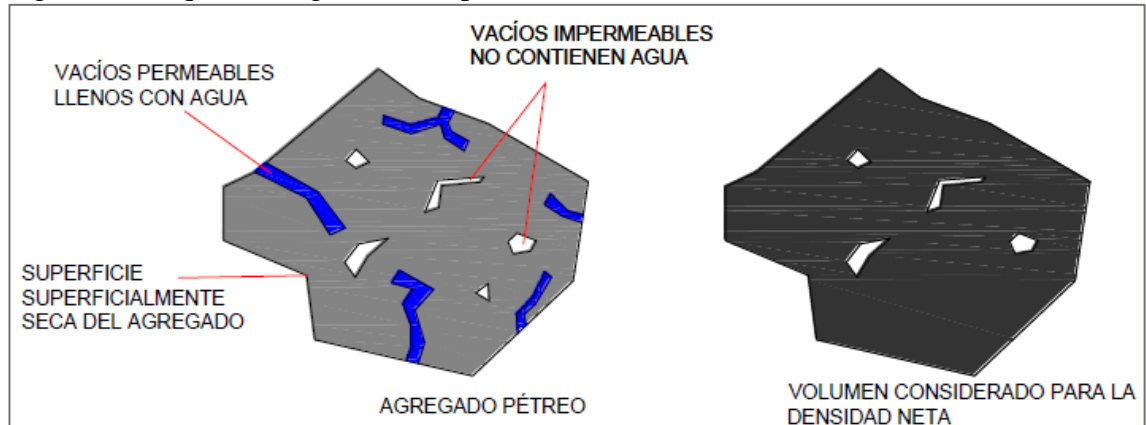
Como el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas. La gravedad específica neta para el agregado total se calcula utilizando la ecuación 25.

Figura 23. Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.



Fuente: El autor con base en INV E-799-13

Figura 24. Esquema de gravedad específica bulk



Fuente: García Salas, 2014

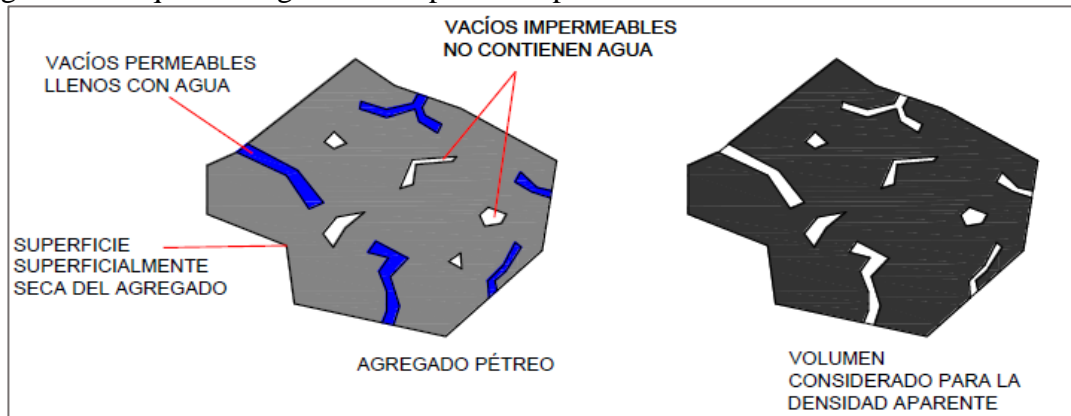
$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (25)$$

Donde, G_{sb} = Gravedad específica bulk (G_{sb}); P_1, P_2, P_n = Porcentajes individuales por masa del agregado; G_1, G_2, G_n = Gravedad específica bulk individual del agregado.

-Gravedad específica aparente del agregado. Se obtiene midiendo la masa seca y el volumen aparente de la muestra del agregado de acuerdo a la norma INV E-222-13, INV E-223-13/ASTM C127, ASTM C128. El volumen aparente sólo incluye el volumen del

sólido del agregado y no incluye el volumen de los poros de la superficie o permeables, pero si incluye el volumen de poros impermeables. En la figura 25 se muestra en forma esquemática el concepto. De igual forma, para el cálculo de la gravedad específica aparente se utiliza la ecuación 25, teniendo en cuenta las gravedades aparentes de cada fracción del agregado.

Figura 25. Esquema de gravedad específica aparente.



Fuente: [García Salas, 2014](#)

-*Gravedad específica efectiva del agregado.* Se calcula usando la masa seca y volumen efectivo del agregado. El volumen efectivo incluye el volumen de los sólidos del agregado y el volumen de los poros de superficie no llenos de asfalto. La gravedad específica efectiva del agregado no se mide directamente, se calcula conociendo la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) medida en laboratorio. G_{mm} se determina siguiendo la norma INV E-735-13/ASTM D2041 ([INVIAS, 2013](#)), para lo cual se elabora una mezcla con un contenido de asfalto cercano al óptimo.

La figura 26 muestra esquemáticamente el concepto de gravedad específica efectiva de los agregados, la cual se calcula con la ecuación 26.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (26)$$

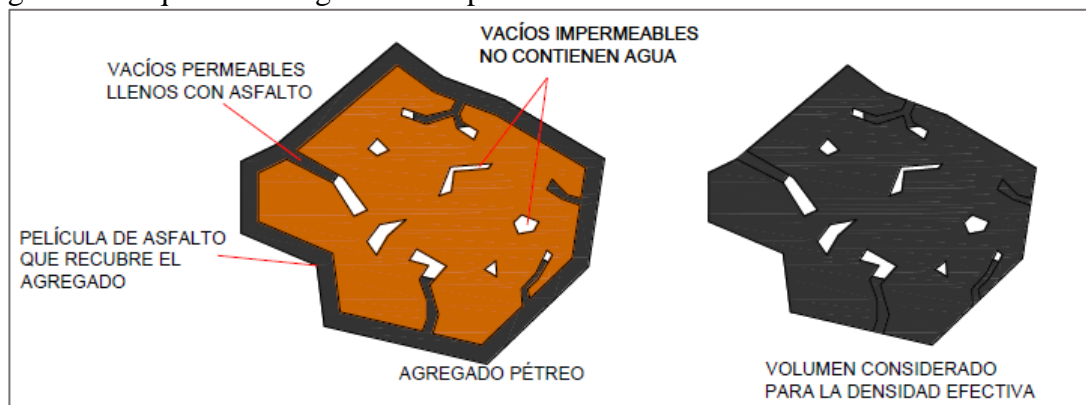
Donde, G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado; G_{mm} = gravedad específica máxima teórica; P_{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100; P_b = contenido de asfalto con el cual se realizó el ensayo de G_{mm} ; G_b = gravedad específica del asfalto.

La gravedad específica efectiva (G_{se}), basada en la gravedad específica máxima medida (G_{mm} – Rice) de la mezcla, se considera constante dado que la variación del contenido de asfalto en la mezcla no hace variar significativamente el porcentaje de asfalto absorbido. Entonces, la gravedad específica efectiva obtenida se usa para determinar la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) de las mezclas para diferentes contenidos de asfalto con la ecuación 27.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (27)$$

Donde, G_{mm} =Gravedad específica máxima teórica; P_{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100; P_s = Porcentaje de agregados en la mezcla; G_{se} =Gravedad específica efectiva de los agregados; P_b =Porcentaje de asfalto en la mezcla; G_b =Gravedad específica del asfalto.

Figura 26. Esquema de la gravedad específica efectiva

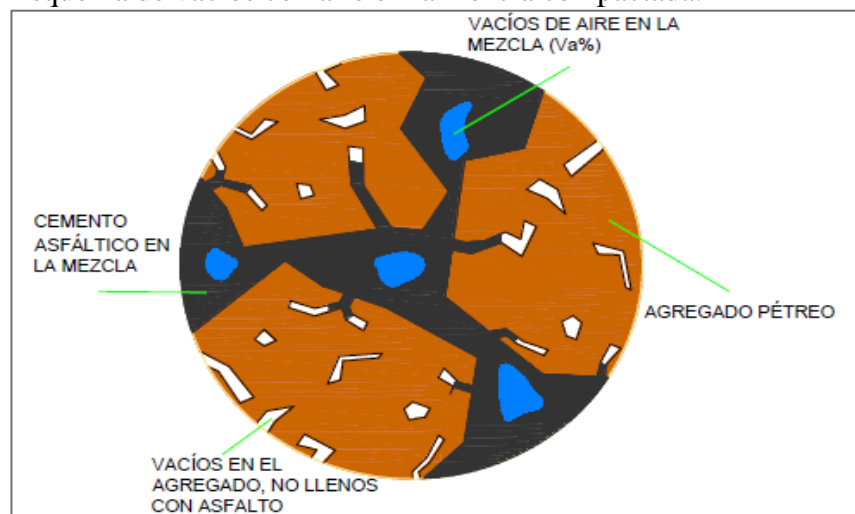


Fuente: [García Salas, 2014](#)

2.5.5.1 Relaciones volumétricas.

-*Vacíos con aire (V_a)*. Es la relación entre el volumen de aire y el volumen total de la mezcla. La figura 27 muestra esquemáticamente el concepto y se determina con la ecuación 28.

Figura 27. Esquema de vacíos con aire en la mezcla compactada.



Fuente: [García Salas, 2014](#)

$$V_a = 100 * \left[\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right] = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] * 100 \quad (28)$$

Donde, V_a = Vacíos con aire en la mezcla compactada; G_{mb} =Gravedad específica bulk de la mezcla compactada; G_{mm} = Gravedad específica máxima teórica.

-*Vacíos en el agregado mineral (VAM)*. Es la relación entre el volumen de asfalto efectivo más el volumen de aire y el volumen total de la mezcla compactada. La ecuación 29 es la utilizada para calcular este parámetro.

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad (29)$$

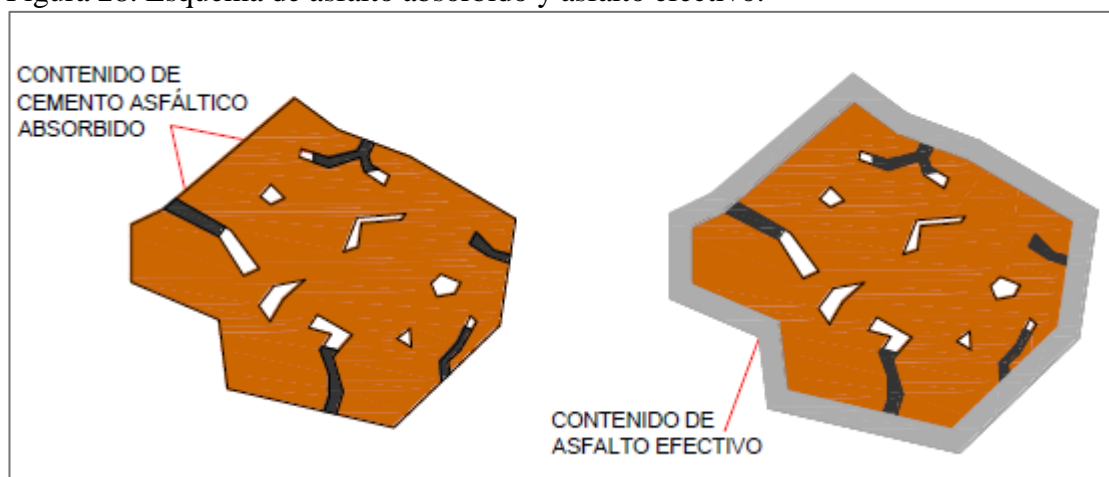
Donde; VAM =Vacíos en el agregado mineral; G_{mb} = Gravedad específica bulk de la mezcla compactada; P_s = Porcentaje de agregados en la mezcla; G_{sb} = Gravedad específica bulk de los agregados.

-*Vacíos llenos de asfalto (VFA)*. Es la relación entre el volumen de asfalto efectivo y el volumen de vacíos en el agregado mineral de una mezcla compactada. La ecuación 30 es la utilizada para el cálculo de este parámetro.

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} * 100 \quad (30)$$

-*Contenido de asfalto absorbido (P_{ba})*.es la relación entre la masa del asfalto absorbido y la masa total del agregado de la mezcla asfáltica compactada. La figura 28 muestra esquemáticamente este concepto, el cual se calcula con la ecuación 31.

Figura 28. Esquema de asfalto absorbido y asfalto efectivo.



Fuente: [García Salas, 2014](#)

$$P_{ba} = 100 * \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right] * G_b \quad (31)$$

Donde, P_{ba} =Asfalto absorbido; G_{se} = Gravedad específica efectiva de los agregados; G_{sb} =Gravedad específica bulk de los agregados; G_b =Gravedad específica del cemento asfáltico.

-*Contenido de asfalto efectivo (P_{be})*. Es la relación entre la masa del asfalto efectivo y la masa total de la mezcla compactada. En la figura 28 se muestra el concepto de asfalto efectivo, el cual se calcula con la ecuación 32.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s \quad (32)$$

Donde, P_{be} = Asfalto efectivo; P_{ba} =Asfalto absorbido; P_b =Contenido de asfalto; P_s =Contenido de agregado.

2.6 PRUEBAS DE DESEMPEÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

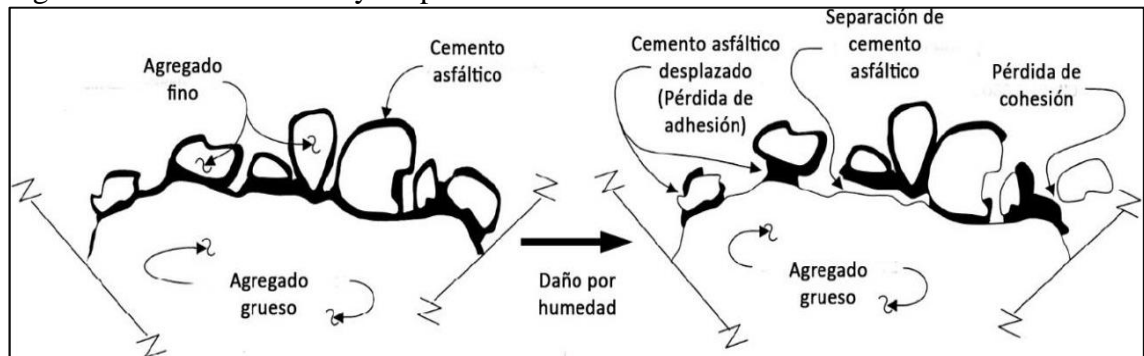
Obtener resultados satisfactorios en el diseño preliminar de mezclas asfálticas, por cualquiera de los métodos, no garantiza que el desempeño de la mezcla a su vez sea satisfactorio. Es por esto, que se han incorporado algunas pruebas de laboratorio que ayudan a tener una idea más real de cómo sería el comportamiento de la mezcla instalada en obra (Velázquez et al., 2017). Lo anterior, teniendo en cuenta que los principales criterios de falla, desde el punto de vista mecanicista, para concretos asfálticos son por deformaciones permanentes (ahuellamiento) y agrietamiento por fatiga.

Como se relacionó anteriormente, dependiendo de la metodología seleccionada para el diseño de la mezcla, se recomienda la realización de ensayos para medir el desempeño de la mezcla. Estos ensayos se realizan de acuerdo al nivel del tránsito o tipo de vía que se desea pavimentar.

2.6.1 Susceptibilidad al daño por humedad. El daño por humedad es uno de los problemas más comunes en los pavimentos asfálticos en países tropicales y en zonas expuestas a periodos prolongados de lluvia (Reyes & Figueroa, 2016). Este fenómeno tiene relación con el enlace por cohesión, que aporta el cemento asfáltico y con el enlace por adhesión, que tiene que ver con la interacción entre el agregado y el cemento asfáltico (R. Hernández et al., 2016).

Este daño también es conocido como daño por desprendimiento y algunos de los daños más frecuentes en los pavimentos son asociados a este fenómeno, como baches y pérdida de agregados. Adicionalmente, si le sumamos los esfuerzos debidos al tránsito, se acelera el deterioro estructural de las capas del pavimento flexible. Estos daños pueden estar asociados a pérdida de adherencia y/o pérdida de cohesión entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo. (McCann & Sebaaly, 2001), como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Escenario antes y después de inducir una mezcla a la humedad



Fuente: [McCann & Sebaaly \(2001\)](#).

En la pérdida de adherencia, el agua entra entre el cemento asfáltico y el agregado, retira la película de cemento asfáltico dejando al agregado sin recubrimiento. Lo anterior, debido a que los agregados tienen una mayor afinidad por el agua que por el cemento asfáltico. La pérdida de cohesión incluye la interacción del agua con el cemento asfáltico, lo que conduce a una reducción de la rigidez entre los componentes de la mezcla ([Howson et al., 2011](#)).

En los últimos años, varios estudios han analizado el problema y han demostrado que la resistencia al daño por humedad depende de la fuerza adhesiva entre el cemento asfáltico y el agregado ([Tan & Guo, 2013](#)). En general, el tipo de falla que ocurre con frecuencia depende principalmente de las propiedades de los materiales. Sin embargo, pueden existir varios factores adicionales que también afectan la el fenómeno de resistencia al daño por humedad como son la adición de modificantes al asfalto ([Aguilar Moya, 2002](#)). También, se ha concluido que el PH del agua tiene un efecto importante en el debilitamiento del enlace por adición entre los materiales ([Howson et al., 2011](#)).

Existen varios métodos para determinar la susceptibilidad al daño por humedad en concretos asfálticos. La gran mayoría son empíricos y buscan evaluar que tan resistente es una mezcla asfáltica a la humedad. Algunos de esos ensayos son: ensayo de ebullición (ASTM D 3625), ensayo de ebullición de Texas (Tex-530-C), ensayo estático de inmersión (AASHTO T 182), ensayo Lottman y Lottman modificado (AASHTO T 283), inmersión compresión (AASHTO T 165), rueda de Hamburgo (AASHTO T 324) y los ensayos de desempeño de Superpave. Adicional a los anteriores, también existen ensayos que se basan en propiedades termodinámicas para cuantificar la afinidad del agregado con el asfalto. Estas pruebas evalúan las propiedades micro-mecánicas asociadas con fallas por adhesión o por cohesión ([Aguilar Moya, 2002](#)).

En Colombia, el método utilizado para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas densas es mediante el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (TSR). El cual está descrito en la norma INV E-725-13 del Instituto Nacional de Vías y en las normas internacionales ASTM D4867/D4867M-96 y AASHTO T283.

Para realizar el ensayo, se elaboran dos grupos de especímenes los cuales son compactados hasta alcanzar un porcentaje de vacíos con aire de $7 \pm 1\%$, un grupo de tres especímenes son acondicionados y el otro grupo de tres especímenes se mantienen en

seco durante todo el proceso del ensayo. El acondicionamiento consiste en llevar los especímenes a un proceso de saturación parcial, hasta alcanzar una saturación entre 55% y 80 %, seguido de un ciclo de congelamiento a -18° C durante 16 horas (opcional en AASHTO y ASTM), después a un ciclo de acondicionamiento a 60° C en baño maría durante 24 horas. Finalmente, previo a la ejecución del ensayo de tracción indirecta, se acondicionan ambos grupos de especímenes en baño maría a 25° C durante dos horas.

El ensayo de tensión indirecta se realiza a deformación controlada, con una velocidad de carga de 50 mm/min (2 pulg./min). El promedio de la resistencia a la tensión de las muestras acondicionadas (R_{TH}) se compara con el promedio de la resistencia a la tensión de los especímenes no acondicionados (R_{TS}). La resistencia a la tensión de cada espécimen se calcula con la ecuación 33 y la relación de la resistencia entre los especímenes acondicionados y no acondicionados se expresa con la ecuación 34.

$$R_T = \frac{2000 * P}{\pi * t * D} \quad (33)$$

$$RRT = \frac{R_{TH}}{R_{TS}} * 100 \quad (34)$$

Donde, P =Carga máxima en N, t =espesor del espécimen en mm y D =diámetro del espécimen en mm.

La mayoría de especificaciones, exigen que el valor de RRT (TSR) sea mayor al 80%, con el fin de asegurar que el daño por humedad no afecte el comportamiento de la mezcla asfáltica. Después de realizar la prueba se realiza una inspección visual de manera subjetiva, con el fin de buscar evidencia de agregado roto o desprendimiento del asfalto en el agregado que pueda haber influido en el resultado de la prueba.

Tanto en los procedimientos estandarizados ASTM como AASHTO, y las recomendaciones sugeridas por Superpave, existen algunas diferencias en el procedimiento de ensayo, referentes a los tiempos de acondicionamiento y tamaño de los especímenes principalmente. Sin embargo, cabe resaltar que aun el mismo procedimiento Superpave recomienda utilizar el mismo tiempo de envejecimiento a corto plazo que utiliza la norma AASHTO T283. Por otro lado, el tamaño de especímenes que utiliza Superpave es de 94 * 150 mm (3.75 * 6 pulgadas), mientras que AASHTO utiliza especímenes de 64 * 100 mm (2.5 * 4 pulgadas), y solo se utilizan las dimensiones especificadas en Superpave si el agregado es mayor a 1 Pulgada (Versión 2003).

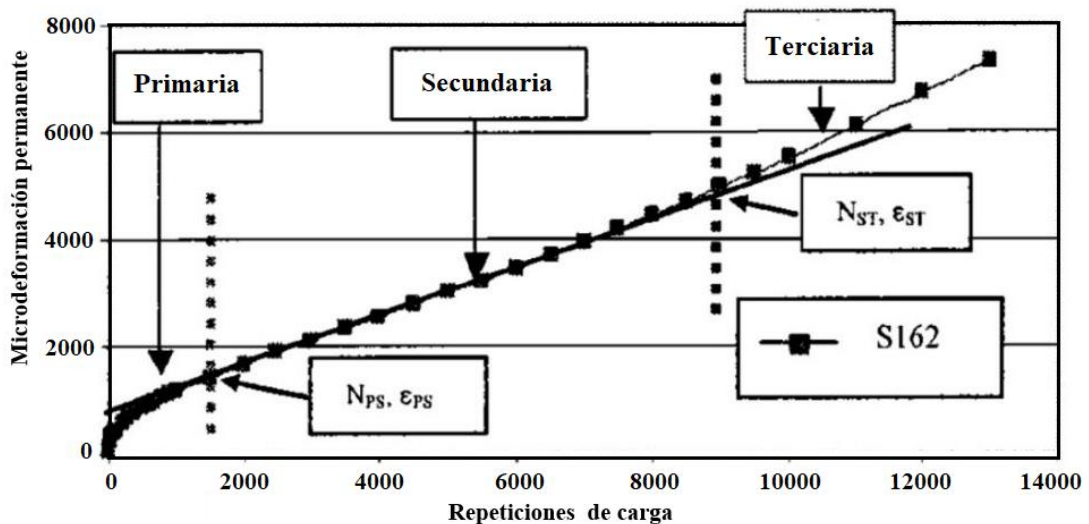
2.6.2 Susceptibilidad a la deformación plástica permanente. Las deformaciones plásticas permanentes (ahuellamiento) es uno de los principales fallos que se producen en el pavimento flexible (J. Zhang et al., 2017). La deformación o ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida (Instituto Nacional de Vías, 2006).

Una mezcla asfáltica bien diseñada debe ser capaz de resistir la deformación y el desplazamiento debidos a las cargas que resultan del tránsito. Un pavimento es estable cuando conserva su forma y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes y otros signos de desplazamientos de la mezcla. El comportamiento frente al ahuellamiento está íntimamente relacionado con el tipo de cemento asfáltico, la composición granulométrica, calidad de los agregados pétreos y aditivos (en algunos casos) empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica (Padilla, 2004), (Garnica et al., 2005).

La deformación permanente tiene un impacto importante en el comportamiento de los pavimentos flexibles durante su vida útil. El ahuellamiento no solo reduce la vida útil de los pavimentos, sino que también puede afectar la seguridad de los usuarios de la vía. Este fenómeno se desarrolla gradualmente a medida que aumenta el número de aplicaciones de carga, es causado por una combinación de densificación y deformación por corte causados por el paso de los vehículos y las altas temperaturas (Brovelli et al., 2015).

De acuerdo a Zhou et al. (2004), las depresiones son causadas por las repeticiones de carga y se van desarrollando gradualmente con el número de cargas acumuladas. Razón por la cual el ahuellamiento se desarrolla en tres etapas o fases: En la fase primaria, el crecimiento de ahuellamiento es distintivamente mayor que el incremento del volumen en las zonas laterales. En la fase secundaria el volumen decrece en el ahuellamiento y es aproximadamente igual al incremento de volumen de las zonas laterales. Finalmente, la deformación permanente comienza a aumentar, provocando un incremento de volumen acelerado. Este aumento marca el inicio de la etapa terciaria. El número de repeticiones de carga en el que comienza esta etapa es conocido como el "número de flujo" y es un indicador característico en las mezclas asfálticas. Como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Curva de comportamiento típica en que se presenta la deformación permanente acumulada.



Fuente: Zhou et al., 2004

Los ensayos de rueda de pista (Wheel-Track Test, WTT) son ensayos empíricos de tipo destructivo, estos son usados generalmente para clasificar mezclas asfálticas de acuerdo con su susceptibilidad a la deformación dada una temperatura. Estos ensayos de simulación no permiten determinar alguna propiedad de la mezcla asfáltica en particular y tampoco permiten reproducir completamente las condiciones reales de campo. Existen varios dispositivos de rueda de pista que usan básicamente el mismo principio. Los más comunes son el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), la rueda de Hamburgo (HWDT), la rueda de pista española y la rueda de Laboratorio (T. Xu et al., 2014).

En Colombia el método utilizado para evaluar la susceptibilidad a la deformación plástica permanente de mezclas asfálticas es el establecido en la norma INV E-756-13 del Instituto Nacional de Vías. En esta norma el procedimiento descrito para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica consiste en someter una probeta prismática, al paso de una rueda, en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiendo periódicamente la profundidad de la deformación producida. El ensayo se realiza a una temperatura constante de 60 °C, haciendo pasar una rueda dotada de una banda de rodadura de caucho macizo de 5 cm de ancho, que ejerce una presión de contacto de 900 KN/m².

La probeta se somete a un período de ensayo de 120 minutos sin interrupciones o hasta que su deformación alcance 15 mm, lo que ocurra primero, haciendo periódicamente las lecturas en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del inicio del ensayo. Luego, cada 5 minutos hasta completar 45 minutos y a partir de este instante cada 15 minutos hasta completar los 120 minutos de ensayo. A partir de las deformaciones se calcula la velocidad de deformación media, con la ecuación 35.

$$V_{t_2}/V_{t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (35)$$

Donde, V_{t_2}/V_{t_1} =velocidad media de deformación, correspondiente al intervalo de tiempo entre t_1 y t_2 , en $\mu\text{m}/\text{min}$. d_{t_2} y d_{t_1} , deformaciones correspondientes a t_1 y t_2 respectivamente, en μm . t_1 y t_2 , tiempos que dependen del lapso establecido en las especificaciones.

Se calcula la velocidad de deformación en los intervalos de 30 a 40 minutos, 75 a 90 minutos y 105 a 120 minutos. Además, se debe elaborar la curva de deformación (μm) versus tiempo (min).

La norma europea BS-EN 12697-22, describe los métodos de ensayo para determinar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a deformarse cuando están sometidas a carga repetida. Estos ensayos son aplicables a probetas preparadas en el laboratorio o probetas extraídas de un pavimento. La susceptibilidad de la mezcla asfáltica a deformarse se evalúa por la profundidad del ahuellamiento formado por el paso de la rueda cargada a temperatura constante. De acuerdo con esta norma se pueden utilizar 3 equipos de laboratorio: Dispositivo de tamaño grande, dispositivo de tamaño extra grande y dispositivos de tamaño pequeño.

En el caso de Colombia y de acuerdo a la norma INV E-756-13, sería utilizado el dispositivo pequeño, cuyo procedimiento es: se comienza con el acondicionamiento de las probetas a 60°C, durante un periodo de tiempo mínimo de 4 horas, para probetas con un espesor igual o menor de 60 mm, y mínimo de 6 horas, para probetas con un espesor mayor de 60 mm. En ambos casos con un máximo de 24 horas.

Luego del acondicionamiento de la probeta, existen dos procedimientos de ensayo descritos a continuación:

Procedimiento A: se coloca el equipo en marcha y se toman lecturas de desplazamiento vertical de la rueda, primero la lectura inicial y luego cada 25 ± 1 ciclos de carga, estas lecturas se toman en el rango de 10 mm a cada lado del centro de la probeta tomando el promedio de la deformación. El ensayo de rodadura se continúa hasta que se apliquen 1000 ciclos de carga o hasta que la profundidad de la rodera sea de 15 mm, lo que ocurra primero.

Procedimiento B: se coloca el equipo en marcha y se toman lecturas de desplazamiento vertical de la rueda, cada 250 ciclos de carga, estas lecturas se toman en el rango de 50 mm a cada lado del centro de la probeta tomando el promedio de la deformación. El ensayo de rodadura continúa hasta que se apliquen 10000 ciclos de carga o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 mm, lo que ocurra primero.

Los cálculos para determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente se realizan con las ecuaciones 36, 37 y 38.

$$WTS_{aire} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (36)$$

$$WTS_{media} = \frac{WTS_{aire1} + WTS_{aire2}}{2} \quad (37)$$

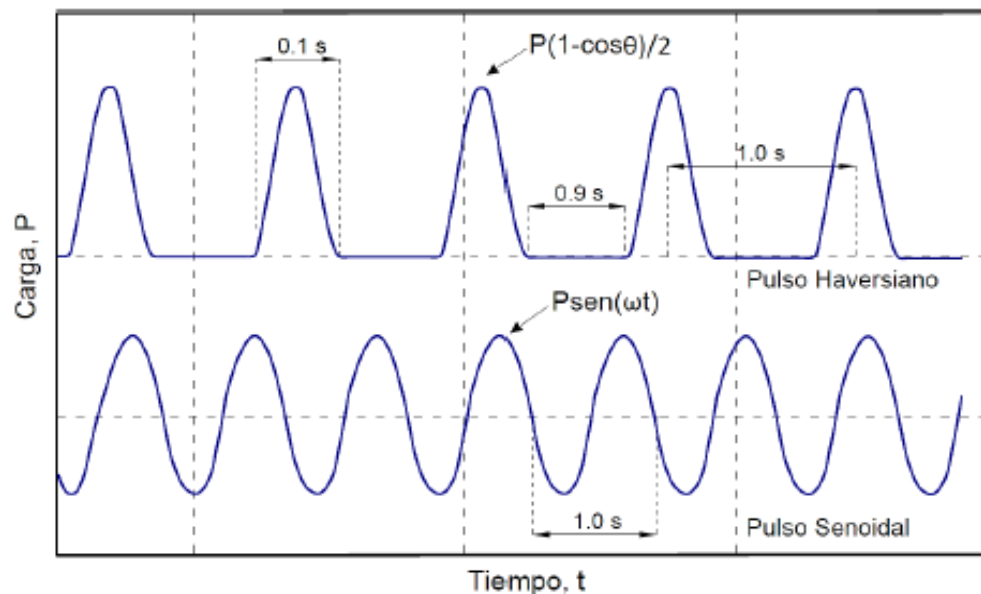
$$PRD_{aire} = 100 \left(\frac{e}{RD_{aire}} \right) \quad (38)$$

Donde, WTS_{aire} = pendiente media de la deformación en mm, d_{5000} y d_{10000} = profundidad de la deformación después de 5000 y 10000 ciclos de carga en mm, WTS_{media} =pendiente media de deformación de las dos placas que componen el ensayo en mm, PDR_{aire} =porcentaje de la profundidad de la deformación en %, e = espesor nominal de la probeta en mm, y RD_{aire} = profundidad de la deformación en cada probeta en mm.

2.6.3 Módulo resiliente y módulo dinámico. A pesar de que el módulo resiliente es un parámetro del concreto asfáltico muy conocido y estudiado, las últimas tendencias en el diseño de estructuras de pavimento, como MEPDG, se basan fundamentalmente en el módulo dinámico al considerar que es un parámetro que representa mejor el comportamiento del material ante la carga inducida por los vehículos (Stempihar et al., 2015).

Por lo general, se suele confundir el módulo resiliente y el módulo dinámico. Ambos conceptos relacionan la magnitud de una respuesta de deformación con algún esfuerzo aplicado. En el módulo resiliente, el patrón de carga consiste en un pulso de carga haversiano seguido de un periodo de descanso (0.1 segundo de carga y 0.9 segundos de descanso), se mide a tres temperaturas diferentes (5, 20 y 40 ° C). El ensayo de módulo resiliente en concreto asfáltico, ASTM D4123, es sencillo y se puede aplicar a núcleos obtenidos en campo. El módulo dinámico representa la respuesta esfuerzo-deformación bajo una carga cíclica senoidal sin periodo de descanso entre ciclos, existen varios protocolos, pero el más utilizado cubre el rango de 20 a 40 ° C y a frecuencias entre 0.1 a 10 Hz (Stempihar et al., 2015). En la figura 31, se ilustra la diferencia de la aplicación de la carga para los dos tipos de ensayos.

Figura 31. Pulsos de carga aplicada a los ensayos módulo resiliente y módulo dinámico



Fuente: Romero, 2018

2.6.3.1 Módulo resiliente. El módulo resiliente es el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable. Esto se refiere a que las deformaciones resilientes o elásticas se caracterizan por tener una recuperación instantánea. Mediante pruebas de carga repetida, se observa que después de un número de ciclos de carga, el módulo llega a ser casi constante y la respuesta de la mezcla puede considerarse como elástica. En este caso el módulo resiliente se define como el cociente entre el esfuerzo aplicado y una deformación recuperable (Kumlai et al., 2014). Como se muestra en la ecuación 39.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (39)$$

Donde, M_r =módulo resiliente en MPa, σ_d =esfuerzo desviador en kN, ε_r = deformación recuperable.

Para el cálculo del módulo resiliente existen diferentes métodos de ensayos como el ensayo de flexión, ensayos de tracción indirecta y ensayos de tracción directa uniaxial. En Colombia, el método utilizado para evaluar los módulos resiliente de concretos asfálticos es el establecido en la norma INV E-749-13, esta reglamenta el proceso de fabricación y ensayo de los especímenes aplicando el ensayo de tensión indirecta con carga repetida. Esta norma tiene como referencia la norma internacional ASTM D7369-11.

El procedimiento descrito en la norma INVIAS consiste en la aplicación de cargas cíclicas de compresión con el periodo de reposo entre la aplicación de las cargas. De los datos de deformación se obtienen dos valores de módulo resiliente. Uno llamado módulo resiliente instantáneo, que se calcula empleando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga de un ciclo, ecuación 40. Y el otro, llamado módulo resiliente total, se calcula empleando la deformación recuperable total la cual incluye la recuperable instantánea y la recuperable dependiente del tiempo que continua durante la descarga y el resto del periodo de reposo del ciclo, ecuación 41. (INVIAS, 2013f) (Kumlai et al., 2014).

$$E_i = P \frac{(\gamma + 0.27)}{t * D_t} \quad (40)$$

$$E_t = P \frac{(\gamma + 0.27)}{t * D_t} \quad (41)$$

Donde, E_i = módulo resiliente instantáneo en MPa, E_t = módulo resiliente total en MPa, P =carga vertical aplicada en N, γ =relación de Poisson, t = espesor del espécimen en mm, D_t =deformación horizontal recuperable en mm.

2.6.3.2 Módulo dinámico. El módulo complejo E^* es una medida de la rigidez en materiales visco-elásticos. Es una de las propiedades importantes en un concreto asfáltico, ya que permite predecir el comportamiento de un pavimento sometido a esfuerzos analizando su deformación. Utilizando este parámetro se puede realizar el diseño de la mezcla asfáltica y el diseño estructural de la capa del pavimento (Mallela et al., 2009).

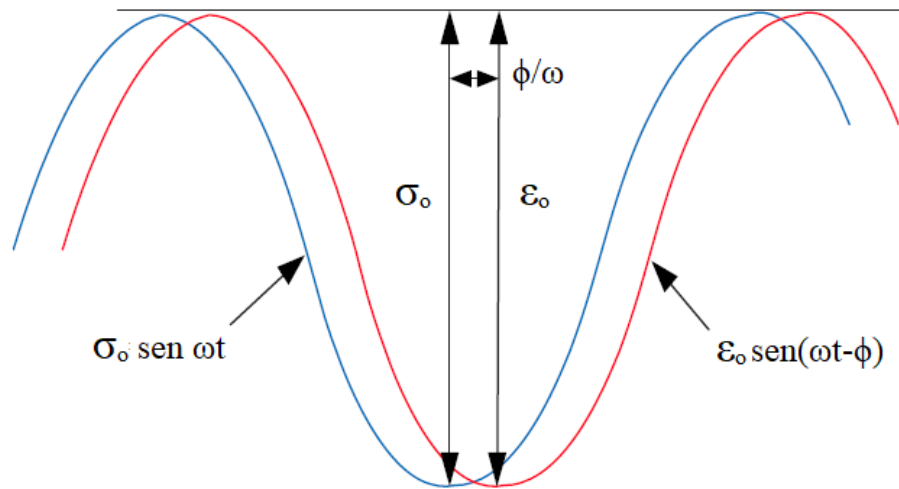
La relación esfuerzo-deformación bajo una carga sinusoidal continua se denomina módulo dinámico complejo (E^*). Este es un número que relaciona el esfuerzo con la deformación del material visco-elástico sometido a una carga aplicada continuamente en el dominio de la frecuencia. El módulo complejo se define como la relación de las amplitudes del esfuerzo sinusoidal en cualquier tiempo dado (t) y la frecuencia de carga angular (ω), $\sigma = \sigma_o \text{sen}(\omega t)$ y la amplitud o ángulo de fase de la deformación sinusoidal, $\phi = \varepsilon_o \text{sen}(\omega t - \phi)$, al mismo tiempo y frecuencia, lo que da como resultado la respuesta constante que se muestra en la figura 32 (Nega et al., 2015).

La ecuación 42, muestra la expresión matemática del módulo dinámico.

$$|E^*| \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o \text{sen}(\omega t)}{\varepsilon_o \text{sen}(\omega t - \phi)} \quad (42)$$

El ángulo de fase representa gráficamente la diferencia que existe entre las curvas de esfuerzo y deformación. Esto se puede interpretar como el desfase que existe entre la aplicación de la carga y la deformación que sufre el espécimen. El ángulo de fase también es un indicador de las propiedades visco-elásticas de una mezcla asfáltica en estado compacto. Para un material completamente elástico, $\phi=0$, el módulo complejo E^* es igual al módulo dinámico $|E^*|$. Para materiales completamente viscosos, $\phi=90^\circ$ (Dougan et al., 2003).

Figura 32. Módulo (complejo) dinámico



Fuente: Nega et al., 2015.

El módulo dinámico se puede determinar y estimar mediante pruebas de laboratorio o mediante modelos matemáticos, el modelo más empleado es el conocido como “ecuación predictiva del módulo dinámico de Witczak”, desarrollado en el marco de la guía MEPDG (Moreno & Soares, 2015). Algunas metodologías de ensayos en laboratorio, que permiten determinar el módulo dinámico, están reglamentadas en las normas internacionales como EN 12697-26, AASHTO T342, ASTM D3496 y ASTM D3494.

2.6.4 Fatiga. La fatiga en concretos asfálticos es un fenómeno asociado con la disminución de resistencia mecánica bajo los efectos de una carga cíclica inferior al valor de rotura. En pavimentos flexibles es uno de los principales mecanismos de deterioro, la cual provoca un aumento de las deflexiones y una disminución en la capacidad de soporte de la capa de mezcla asfáltica (Bhasin et al., 2009), (Liu et al., 2017).

La fatiga en mezclas asfálticas ocurre debido al incremento de grietas, estas grietas comienzan como vacíos de aire que se comprimen durante el proceso de compactación y como defectos en el cemento asfáltico. El crecimiento de las grietas puede ocurrir como fisuras adhesivas y cohesivas dentro de la mezcla. La fisura adhesiva ocurre en las películas delgadas de cemento asfáltico que cubre los agregados y se desarrollan en la interface entre el agregado y el cemento asfáltico. La fisura cohesiva ocurre dentro del cemento asfáltico en las películas más gruesas (Lytton et al., 2015).

En la actualidad, existen varios métodos de ensayo en laboratorio y criterios o enfoques para predecir la vida a la fatiga. En cuanto a los ensayos de laboratorio, de acuerdo con el modo de carga, las pruebas más utilizadas se clasifican como prueba simple de flexión (en 2, 3 y 4 puntos), prueba de carga axial directa y prueba de carga diametral. Los investigadores de Shell adoptaron la prueba de flexión de dos puntos con espécimen trapezoidal. En Estados Unidos y los Países Bajos, se especifica la prueba a flexión en cuatro puntos. En el reino Unido y Suecia, la prueba de fatiga utilizada es la de tracción (N. Li et al., 2015). Algunas investigaciones han concluido que los resultados de la prueba de fatiga obtenidos por diferentes métodos de prueba son diferentes y difíciles de comparar, se encontró que la vida a la fatiga resultado de la prueba de fatiga por flexión es más larga que la de los otros métodos de prueba y que la prueba de carga diametral tiene la vida más corta (Benedetto et al., 2004) (N. Li et al., 2015).

En Colombia, el método utilizado para determinar la vida a la fatiga de mezclas asfálticas en caliente sometidas a flexión dinámica es el establecido en la norma INV E-784-13, esta norma reglamenta el procedimiento y energía para ensayar muestras compactadas en laboratorio o núcleos tomados del terreno. Los especímenes prismáticos se someten a flexión en cuatro puntos hasta llevarlas a la falla. Esta norma tiene como referencia la norma AASHTO T321-07. También se utiliza el método de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales el cual está definido en la norma INV E-808-13, el cual tiene como referencia la norma UNE-EN 12697-24. Otra alternativa de ensayo es el establecido en la norma BS-EN-12697-24-Anexo E, el cual se realiza con especímenes cilíndricos.

Este último procedimiento describe el ensayo de fatiga bajo carga cíclica, utilizando el ensayo de tracción indirecta. Para este ensayo se puede utilizar una probeta cilíndrica elaborada en el laboratorio o un testigo extraído en campo. La probeta cilíndrica se debe exponer a cargas de compresión repetidas con una señal de carga de medio seno verso a través del plano diametral vertical, que hace que la probeta falle por rotura a lo largo de la parte central del diámetro vertical, las probetas se deben ensayar a tres niveles de esfuerzo y se recomienda tres probetas por cada nivel. Se debe medir la deformación horizontal resultante de la probeta y se debe utilizar una relación de Poisson para calcular la deformación por tracción en el centro de la probeta. La vida de fatiga se debe determinar como el número total de aplicaciones de carga realizadas antes de que se produzca la rotura de la probeta.

Los criterios o enfoques para la determinación de la vida a la fatiga son dos, bajo el enfoque de energía y bajo el enfoque de rigidez. En cada uno de estos enfoques, investigadores han planteado su teoría y modelo para la estimación.

2.6.4.1 Vida a la fatiga bajo enfoque de energía.

Método Carpenter. Este método utiliza el cambio de energía disipada para relacionar el daño acumulado y la vida a fatiga en concretos asfálticos. Se define que la falla a fatiga sucede en el ciclo de carga en el cual los valores de RDEC dejan de ser constantes (Josephia & Ossa, 2017), es decir que pasan de la etapa 2 a la etapa 3 (Carpenter et al., 2003). Para lo cual se define el parámetro de relación de cambio de energía (RDEC) como

se muestra en la ecuación 43, el cual ha sido aceptado como un parámetro apropiado para el análisis del comportamiento a la fatiga (S. Shen et al., 2006).

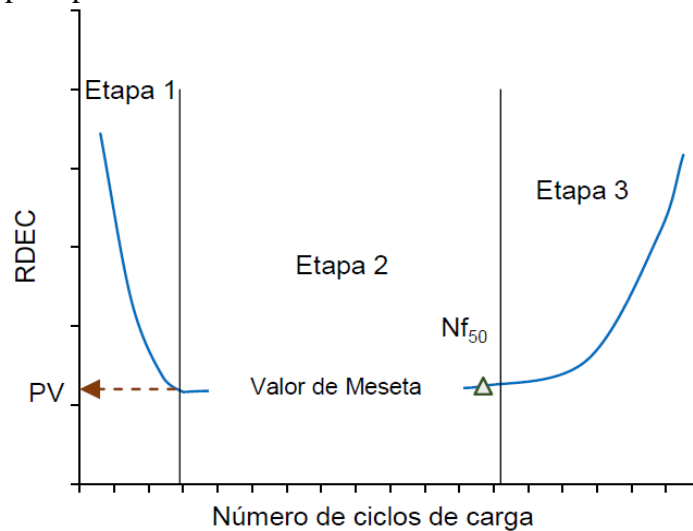
$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (43)$$

Donde, DE_n =energía disipada en el ciclo de carga n, DE_{n+1} =energía disipada en el ciclo de carga n+1.

Los valores de RDEC se representan gráficamente en función del número de ciclos de carga, la cual describe la curva del daño del material. La curva se divide en tres etapas, que indican como la energía se transforma o disipa. La primera etapa se caracteriza por un descenso de pendiente elevada, la cual representa la orientación de las moléculas y la tixotropía del material (K. Ghuzlan & Carpenter, 2000), (S. Shen et al., 2010), (Josephia & Ossa, 2017). En la segunda etapa, la trayectoria de la curva tiende a ser horizontal durante un prolongado número de ciclos de carga, lo que indica que el material ha sufrido un daño interno por el efecto de la carga, reflejado con la aparición de microfisuras. El valor de RDEC en esta etapa es llamado valor meseta “plateau value” (PV). La última etapa, se caracteriza por un aumento del valor de RDEC, indicando que el material empieza a tener un daño pro fatiga (S. Shen et al., 2006).

El punto de falla (N_f) se define como el número de ciclos de carga donde el cambio en la relación de energía comienza a incrementarse como se observa en la figura 33.

Figura 33. Ejemplo típico de RDEC



Fuente: Josephia & Ossa, 2017

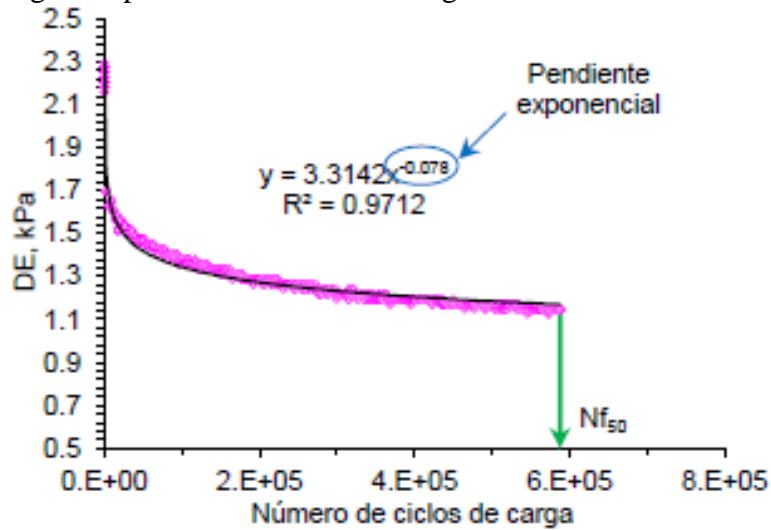
El parámetro PV se puede representar con el valor de RDEC que corresponde al ciclo de carga donde se presenta el 50% de degradación de la rigidez inicial del material (Nf_{50}). Por lo cual, para calcular el valor de PV se emplea la ecuación 44, que depende de la pendiente exponencial k de la curva ajustada de energía disipada (DE), como se muestra

en la figura 34. El punto de falla Nf_{50} se obtiene del ensayo estándar de fatiga (Carpenter et al., 2003), (K. A. Ghuzlan & Carpenter, 2006), (Josephia & Ossa, 2017).

$$PV = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{Nf_{50}}\right)^k}{100} \quad (44)$$

Método Hopman. Este método utiliza el concepto de la Relajación de Energía (ER) para determinar la vida a la fatiga de concretos asfálticos bajo condiciones de deformación controlada. El punto de falla (N_f) es definido como el número de ciclos de carga donde la relación de energía cambia de pendiente en la curva de relajación de energía (ER_H) versus número de ciclos (Pronk & Hopman, 1991), (Josephia & Ossa, 2017). Con la ecuación 45 se calcula el parámetro ER_H .

Figura 34. Energía disipada versus ciclos de carga



Fuente: Josephia & Ossa, 2017

$$ER_H = \frac{nW_o}{W_n} \quad (45)$$

Donde, ER_H =relajación de energía de Hopman, n =ciclo de carga n , W_o = energía disipada inicial, W_n =energía disipada en el ciclo de carga n .

Método Pronk. Este método desarrolló un modelo bajo el enfoque de energía, el cual define el ciclo de falla (N_f) como el número de ciclos de carga donde la relación de energía (ER_p) cambia de pendiente (Pronk, 1997), (Souliman & Zeiada, 2012), el cual es expresado con la ecuación 46 (Josephia & Ossa, 2017).

$$ER_p = \frac{W_A}{W_n} \quad (46)$$

Donde, ERP =relación de energía de Pronk, WA =energía disipada acumulada en el ciclo de carga n, W_n = energía disipada durante el ciclo de carga n.

2.6.4.2 Vida a la fatiga bajo el enfoque de la rigidez.

Método de Rowe. Este método es una modificación del modelo de Hopman. Este modelo se puede emplear para determinar la vida a la fatiga teniendo en cuenta la metodología para esfuerzo controlado o para deformación controlada. El método de Rowe, ecuación 47, establece como criterio de falla a fatiga el punto máximo de la curva de rigidez (SR_R) contra ciclos de carga (Rowe, 1993), (Souliman & Zeiada, 2012), (Josephia & Ossa, 2017).

$$SR_R = n * S \quad (47)$$

Donde, SR_R = relación de rigidez de Rowe, n = ciclos de carga n, S = rigidez a flexión en el ciclo n.

Método ASU. Desarrollado en la Universidad del Estado de Arizona (ASU), la relación ($n*S$) presentada por Rowe la normaliza dividiendo por la rigidez inicial (S_o) del material. En la ecuación 48 se presenta el modelo propuesto por ASU para determinar la falla a fatiga (Josephia & Ossa, 2017). De acuerdo a este método, la vida a la fatiga se define como el punto máximo de la curva de relación de rigidez contra número de ciclos de carga. Según Souliman et al (2012), los métodos de Rowe y ASU son los más precisos y sencillos para analizar los resultados en muestras prismáticas de concreto asfáltico ya que son independientes de la temperatura de prueba y del tipo de mezcla.

$$SR_{ASU} = \frac{n * S}{S_o} \quad (48)$$

Donde, SR_{ASU} = relación de rigidez de ASU, n =ciclo de carga n, S = rigidez a flexión en el ciclo n, S_o = rigidez inicial del ciclo número 50.

2.6.4.3 Límite de endurecimiento a fatiga (FEL, Fatigue Endurance Limit). Se define como la amplitud de deformación por debajo del cual el concreto asfáltico no presenta daños por fatiga cuando es sometido a un número ilimitado de ciclos de carga (R. Michael Anderson et al., 2010). El modelo para determinar el límite de endurecimiento a fatiga de laboratorio se muestra en la ecuación 49, el cual se basa en un límite de predicción del 95% de 50 millones de ciclos de carga de un análisis de regresión lineal entre los niveles de deformación y el ciclo o punto de falla a fatiga (Josephia & Ossa, 2017).

$$FEL = \hat{y}_o - t_{\alpha} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_o - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (49)$$

Donde, \hat{y}_o = logaritmo de la predicción del nivel de deformación ($\mu\epsilon$), t_{α} =valor de la distribución; t para $n-2$ grados de libertad = 1.9432 para $n=8$ con $\alpha=0.05$, s =estimación de la desviación estándar a partir del análisis de regresión, n = número de muestras, x_o =Log 50.000.000, \bar{x} =promedio del logaritmo de los resultados a la vida a fatiga, $S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_o - \bar{x})^2$.

3. ENSAYOS Y RESULTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se identificó el estado del arte y la teoría del tema relacionado con la utilización de residuos siderúrgicos en la fabricación de concretos asfálticos, así como las metodologías utilizadas para determinar la cantidad de cada material para obtener una mezcla que cumpla con las características establecidas y así garantizar un comportamiento adecuado una vez sea puesta a servicio. Ahora, el presente capítulo plantea la metodología utilizada en el desarrollo del trabajo para resolver las preguntas de investigación planteadas.

La metodología utilizada proporcionó las herramientas y datos necesarios para el análisis. El capítulo comprende tres temas principales:

- La definición de hipótesis, variables e indicadores
- Las etapas, procedimientos, técnicas utilizadas en la caracterización de los materiales y el desarrollo experimental
- El proceso de recolección y procesamiento de la información.

Los objetivos de este capítulo son:

- Describir la metodología planteada para el desarrollo de la investigación.
- Explicar el proceso de obtención y procesamiento de la información obtenida.
- Presentar y discutir los resultados obtenidos.

3.2 DEFINICIÓN DE HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES

La investigación se planteó siguiendo actividades, procedimientos y ensayos que permitieran encontrar los resultados, analizarlos para poder dar las respuestas a las preguntas de investigación. Para lo cual, se consideraron las siguientes hipótesis generales.

Las características mecánicas (estabilidad y flujo) y los resultados de las pruebas de desempeño de concretos asfálticos elaborados con escoria de horno al oxígeno (BOF) como agregado grueso y polvo de alto horno (BFD) como agregado fino, reemplazando totalmente (100%) o parcialmente (50%) los agregados convencionales (grava y arena respectivamente), cumplirán con los requerimientos establecidos en las especificaciones para un tipo de mezcla MDC-19 y para un nivel de tránsito NT3, obteniendo iguales o mejores características en comparación con las encontradas en concreto asfáltico elaborado con agregados convencionales.

Las características mecánicas (estabilidad y flujo) y los resultados de las pruebas de desempeño de concretos asfálticos elaborados con escoria de horno de arco eléctrico (EAF) como agregado grueso y polvo de alto horno (BFD) como agregado fino, reemplazando totalmente (100%) o parcialmente (50%) los agregados convencionales

(grava y arena respectivamente), cumplirán con los requerimientos establecidos en las especificaciones para un tipo de mezcla MDC-19 y para un nivel de tránsito NT3; obteniendo iguales o mejores características en comparación con las encontradas en concreto asfáltico elaborado con agregados convencionales.

Las características mecánicas (estabilidad y flujo) y los resultados de las pruebas de desempeño de concretos asfálticos elaborados con escoria de horno de arco eléctrico (EAF) como agregado grueso, reemplazando totalmente (100%) o parcialmente (50%) el agregado grueso convencional (grava) y arena como agregado fino, cumplirán con los requerimientos establecidos en las especificaciones para un tipo de mezcla MDC-19 y para un nivel de tránsito NT3; obteniendo iguales o mejores características en comparación con las encontradas en concreto asfáltico elaborado con agregados convencionales.

Las características mecánicas (estabilidad y flujo) y los resultados de las pruebas de desempeño de concretos asfálticos elaborados con polvo de alto horno (BFD) como agregado fino, reemplazando totalmente (100%) o parcialmente (50%) el agregado fino convencional (arena) y grava como agregado grueso, cumplirán con los requerimientos establecidos en las especificaciones para un tipo de mezcla MDC-19 y para un nivel de tránsito NT3; obteniendo iguales o mejores características en comparación con las encontradas en concreto asfáltico elaborado con agregados convencionales.

Los factores que inciden en los experimentos se muestran en la tabla 9, y hacen parte de las variables independientes.

Tabla 9. Variables independientes

Factores de control	
Parámetro	Característica
<i>Tipo de ligante</i>	Cemento asfáltico
Tipo de cemento asfáltico	AC 60-70
Tipo de llenante mineral (Filler)	Finos de trituración
Tipo de mezcla	MDC-19
Granulometría de diseño	Ver figura 49
Factores experimentales	
Tipo de agregado grueso	3 clases
Tipo de agregado fino	2 clases

Fuente: El autor.

Los factores de control fueron identificados como fuentes de variación que se mantuvieron constantes para evitar su influencia en los resultados. Mientras que los factores experimentales presentan diferentes niveles que hacen parte de las combinaciones de estudio. Para poder llevar a cabo la utilización de escoria EAF, escoria BOF y de BFD como sustitutos de los agregados dentro del concreto asfáltico, es necesario conocer las características de cada uno. Se realizaron ensayos físicos y mecánicos para determinar sus propiedades y verificar el cumplimiento de las especificaciones. También, es necesario determinar las propiedades químicas para conocer la composición y características de cada material.

En la tabla 10, se muestran las variables dependientes, es decir, los ensayos que se realizaron a las mezclas para determinar sus características. La metodología seguida durante el desarrollo de la investigación, fue estructurada en distintas etapas, donde cada una de ellas tiene sus procedimientos y tareas a realizar.

Tabla 10. Variables dependientes

Propiedades volumétricas
<i>Vacíos con aire (Va)</i>
Vacíos en los agregados minerales (VAM)
Vacíos llenos de asfalto (VFA)
Propiedades mecánicas
Estabilidad
Flujo
Relación: estabilidad/flujo
Relación: llenante/ligante efectivo
Propiedades de desempeño
Susceptibilidad a la humedad
Susceptibilidad a la deformación permanente
Módulo resiliente
Leyes de fatiga

Fuente: El autor

3.3 PRESENTACIÓN DE ETAPAS

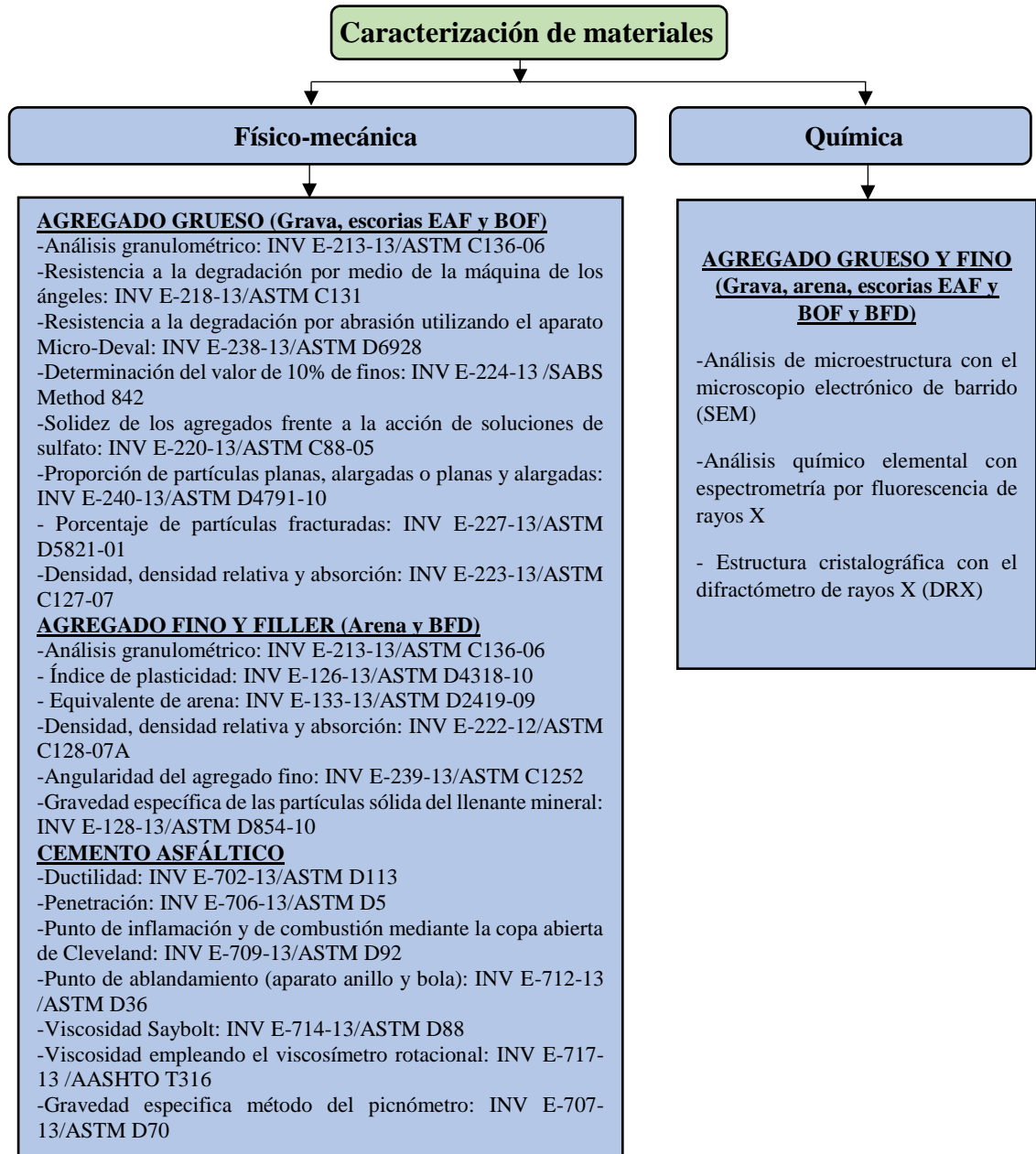
La primera etapa corresponde a la caracterización física y mecánica de los materiales, siguiendo el procedimiento de las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013f) las cuales tienen como referencia las normas ASTM. Los ensayos de caracterización a los agregados comprendió la realización de ensayos como: resistencia a la degradación por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles, determinación de la resistencia a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval, resistencia mecánica por el método del 10% de finos, pérdida de ensayo de solidez, índice de plasticidad, equivalente de arena, proporción de partículas planas y alargadas, porcentaje de partículas fracturadas, angularidad de la fracción fina. Los ensayos de caracterización del cemento asfáltico realizado fueron los siguientes: ductilidad, penetración, punto de inflación y combustión, punto de ablandamiento, viscosidad saybolt, densidad y viscosidad con el viscosímetro rotacional. Los resultados se compararon con las especificaciones generales de construcción de carreteras (INVIAS, 2013b). Las muestras de cada material para realizar los ensayos se obtuvieron mediante muestreo aleatorio y se realizaron tres (3) ensayos, con el fin de garantizar resultados confiables.

Seguidamente, se realizó el análisis de microestructura y composición elemental con el microscopio electrónico de barrido (SEM), así como el análisis químico elemental con el espectrómetro por fluorescencia de rayos X, con el fin de identificar los compuestos predominantes, forma, textura y porosidad de cada uno de los materiales. La figura 35 presenta los ensayos y procedimientos utilizados para la caracterización de los materiales. Una vez conocidos los resultados de laboratorio se analizaron las propiedades de cada material y de acuerdo a las dosificaciones propuestas se procedió al diseño de cada una de las mezclas. El diseño se realizó con la metodología Ramcodes, teniendo en cuenta

que es una metodología novedosa y ofrece ventajas técnicas, económicas y los resultados obtenidos son similares a los obtenidos con la metodología tradicional Marshall.

La siguiente etapa corresponde a la caracterización y determinación de las propiedades de cada una de las mezclas, las cuales se analizaron técnica y económicamente para establecer la calidad y su recomendación de uso.

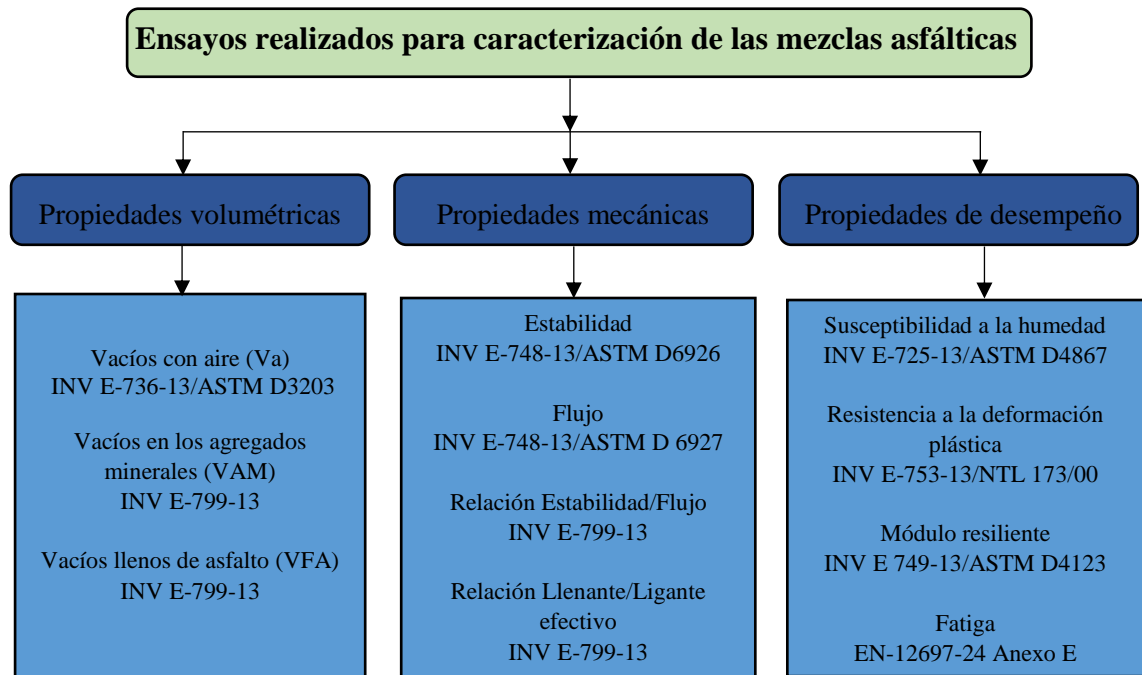
Figura 35. Ensayos de caracterización de los materiales



Fuente: El autor

La figura 36 muestra los procedimientos usados para la caracterización de cada una de las mezclas diseñadas.

Figura 36. Ensayos de caracterización de las mezclas asfálticas



Fuente: El autor

3.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El tipo de concreto asfáltico elegido para el desarrollo de la investigación fue MDC-19 de acuerdo al artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013a), figura 36.

El diagrama de flujo de la figura 37 muestra de manera global la metodología y el desarrollo experimental ejecutado en este trabajo de investigación.

Los materiales utilizados en el estudio fueron:

Agregado grueso: - Material procedente de trituración mecánica tipo grava (GRA)
- Escoria de horno de arco eléctrico (EAF)
- Escoria de horno al oxígeno (BOF)

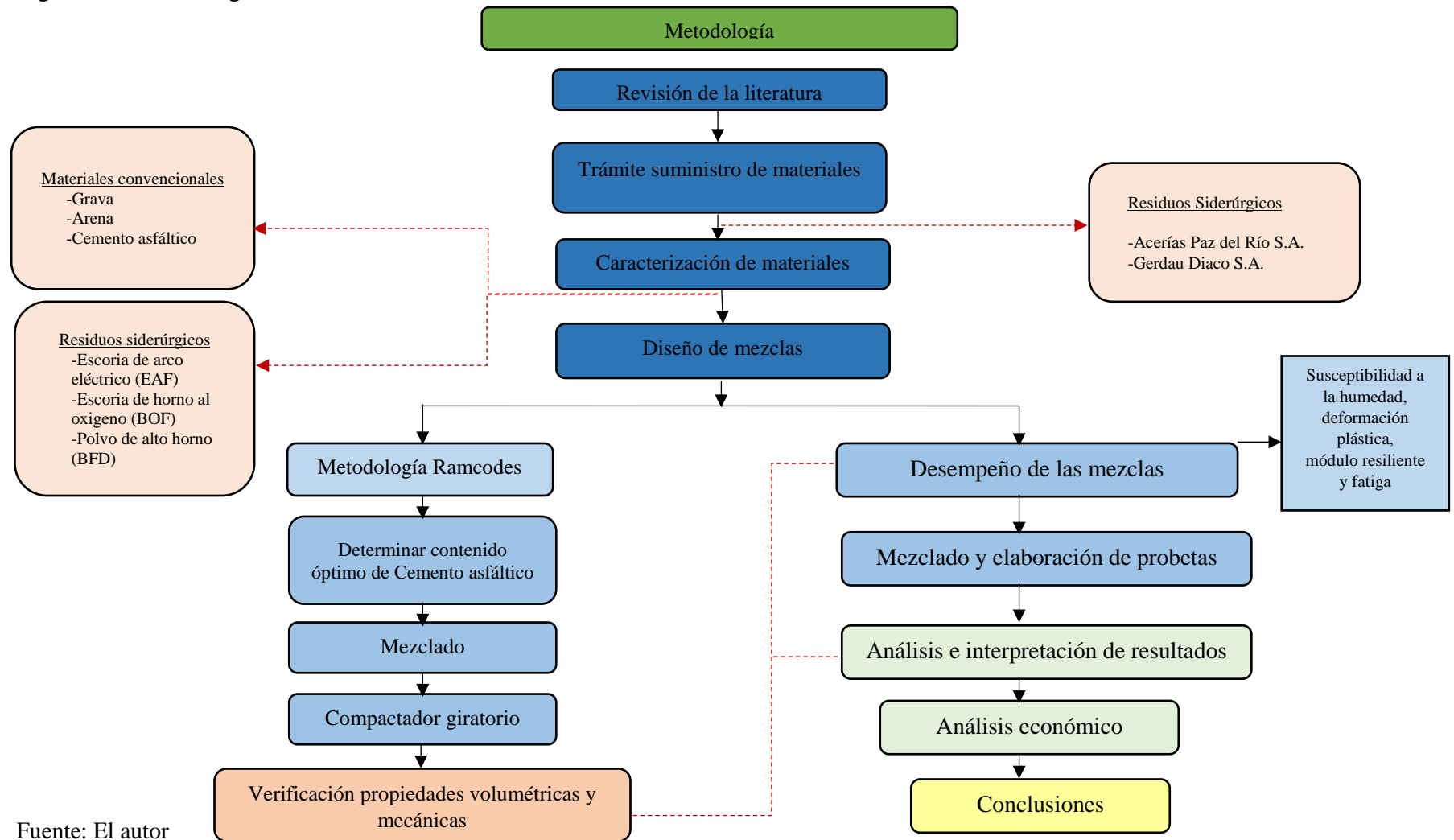
Agregado fino: - Arena (ARE)
- Polvo de alto horno (BFD)

Llenante mineral: - Finos de trituración

Ligante: - Cemento asfáltico tipo AC 60-70

De acuerdo con el objetivo de la investigación, se reemplazó parcial y totalmente los agregados convencionales por los residuos siderúrgicos. La figura 38 muestra la dosificación de las once (11) mezclas.

Figura 37. Metodología



Fuente: El autor

Esta dosificación se planteó teniendo en cuenta que investigaciones similares han sustituido el agregado convencional en proporciones inferiores al 50% y no han considerado la sustitución total del agregado convencional.

Figura 38. Dosificación mezclas

Identificación mezcla	Composición de la mezcla					Observaciones
	Agregado grueso			Agregado fino		
	GRA	BOF	EAF	ARE	BFD	
M-1	●			●		Mezcla base
M-2	●	●		●	●	Mezclas con escoria de horno al oxígeno y polvo de alto horno
M-3		●			●	
M-4	●		●	●	●	Mezclas con escoria de horno de arco eléctrico y polvo de alto horno
M-5			●		●	
M-6	●	●	●	●	●	Mezclas con escoria de horno de arco eléctrico, escoria de horno al oxígeno y polvo de alto horno
M-7		●	●		●	
M-8	●		●	●		Mezclas con escoria de horno de arco eléctrico
M-9			●	●		
M-10	●			●	●	Mezclas con polvo de alto horno
M-11	●				●	

Fuente: El autor

La mezcla M-1 elaborada con materiales convencionales (grava y arena), la cual es la mezcla base de control contra la que se compararon los resultados de las otras mezclas.

En la mezcla M-2 se sustituyó en 50% la fracción de agregado grueso por escoria BOF y en 50% la fracción de agregado fino por BFD.

La mezcla M-3 elaborada en su totalidad con residuos siderúrgicos, la fracción de agregado grueso con escoria BOF y la fracción de agregado fino con BFD.

La mezcla M-4 elaborada con materiales convencionales y residuos siderúrgicos, la fracción de agregado grueso se reemplazó en una proporción del 50% por escoria EAF y la fracción de agregado fino también en 50% por BFD. En la mezcla M-5 se utilizó como agregado grueso solo escoria EAF y como agregado fino solo BFD.

La mezcla M-6 se elaboró con todos los materiales utilizados en la investigación, en la fracción de agregado grueso se utilizó en proporciones iguales grava, escoria EAF y escoria BOF; y en la fracción de agregado fino arena y BFD.

La mezcla M-7 en su totalidad con residuos siderúrgicos, el agregado grueso compuesto por escoria EAF y escoria BOF en proporciones iguales y el agregado fino en su totalidad con BFD.

En la mezcla M-8 solo se introdujo como variable la escoria EAF, es decir la fracción de agregado grueso está compuesta por grava y escoria EAF en proporciones iguales y como

agregado fino se utilizó solo arena.

La mezcla M-9 corresponde a la mezcla elaborada con solo escoria EAF como agregado grueso y solo arena como agregado fino.

Las mezclas M-10 y M-11 fueron elaboradas utilizando únicamente el BFD como agregado fino. Es decir, en la mezcla M-10 la fracción de agregado grueso está compuesto en su totalidad por grava y la fracción de agregado fino por arena y BFD en proporciones iguales. Y la mezcla M-11 en su totalidad la fracción de agregado fino está compuesto por BFD.

En todas las mezclas se utilizó como llenante mineral (pasa tamiz No. 200) finos producto de la trituración del material convencional utilizado como agregado grueso (grava).

3.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para el correcto desarrollo de la investigación y de los ensayos de laboratorio es necesario obtener materiales adecuados. Es decir, que provengan de fuentes confiables para obtener resultados adecuados.

3.5.1 Procedencia y características visuales de los materiales. La procedencia de cada uno de los materiales utilizados en esta investigación es:

- Grava, arena natural y llenante mineral. Obtenidas de la cantera La Roca de la ciudad de Moniquirá (Boyacá), ubicada 56 kilómetros de la ciudad de Tunja. En la figura 39 se muestra la ubicación de la cantera.

Figura 39. Ubicación cantera La Roca

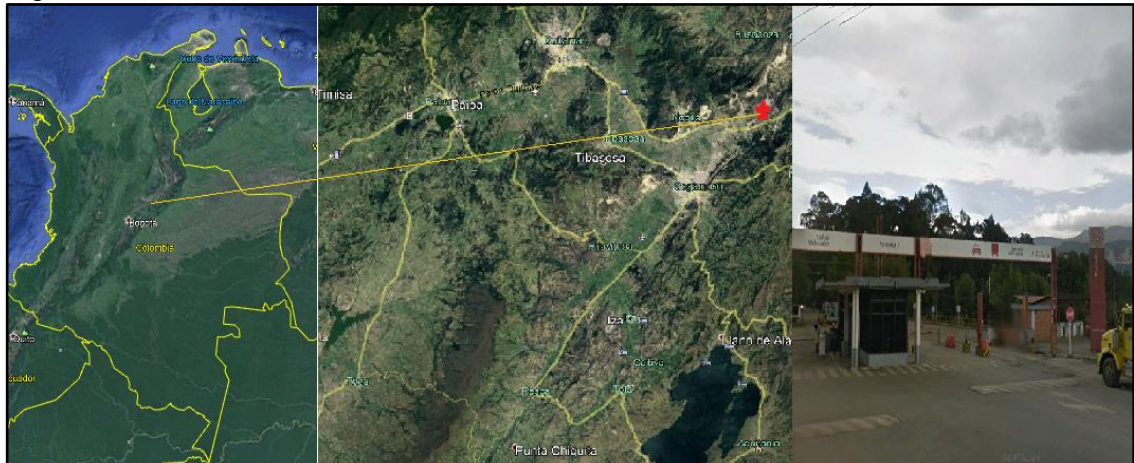


Fuente: El autor a partir de Google Earth Pro.

- Escoria de horno al oxígeno (BOF) y polvo de alto horno (BFD). Obtenidos en la empresa Acerías Paz del Río S.A., localizada en el departamento de Boyacá, a 71 kilómetros de Tunja. En la figura 40 se muestra la ubicación de la empresa.

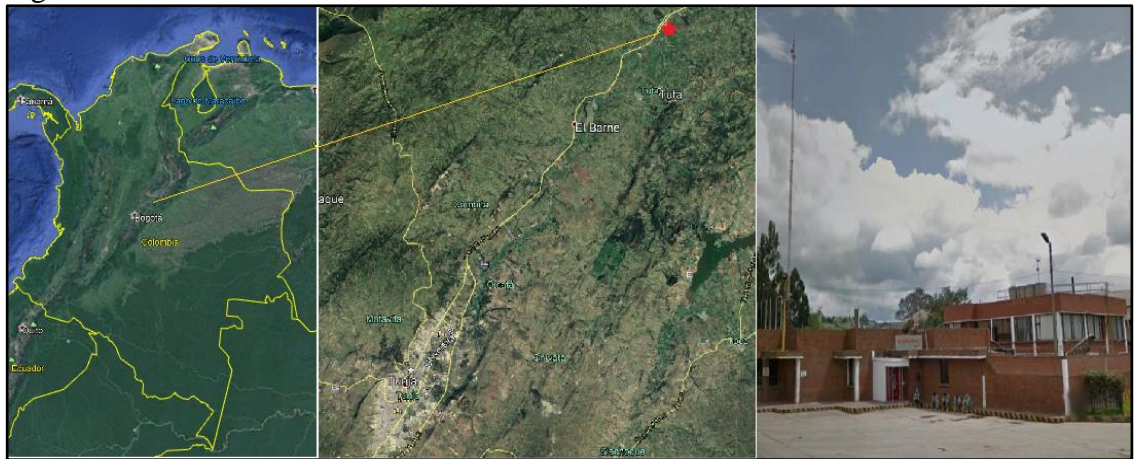
- Escoria de horno de arco eléctrico (EAF). Obtenida en la empresa Gerdau-Diaco S.A., localizada en el departamento de Boyacá, a 25 kilómetros de Tunja. Ver figura 41.
- Cemento asfáltico. Suministrado por la empresa IncoAsfaltos S.A., su sede principal está ubicada en el municipio de Chía, departamento de Cundinamarca. Ver figura 42.

Figura 40. Ubicación Acerías Paz del Río S.A.



Fuente: El autor a partir de Google Earth Pro.

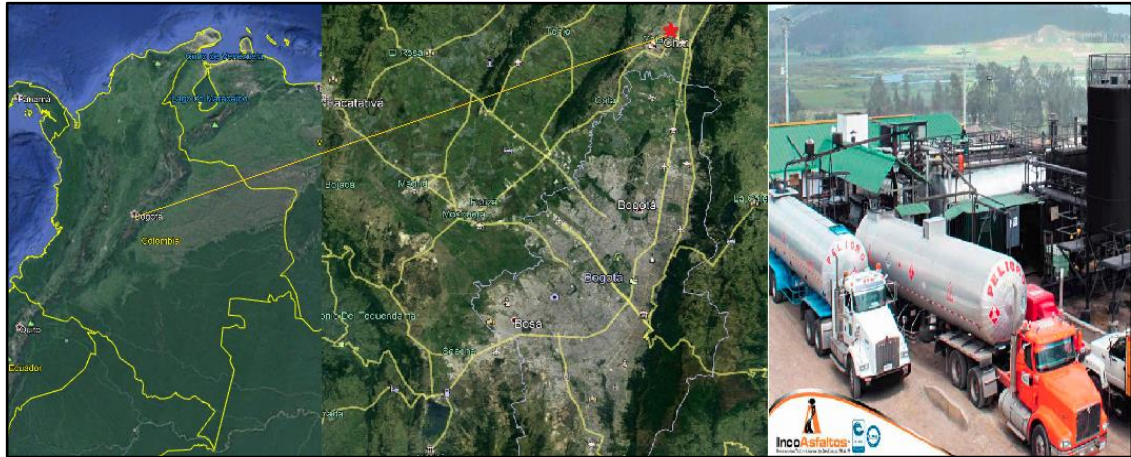
Figura 41. Ubicación Gerdau-Diaco



Fuente: El autor a partir de Google Earth Pro.

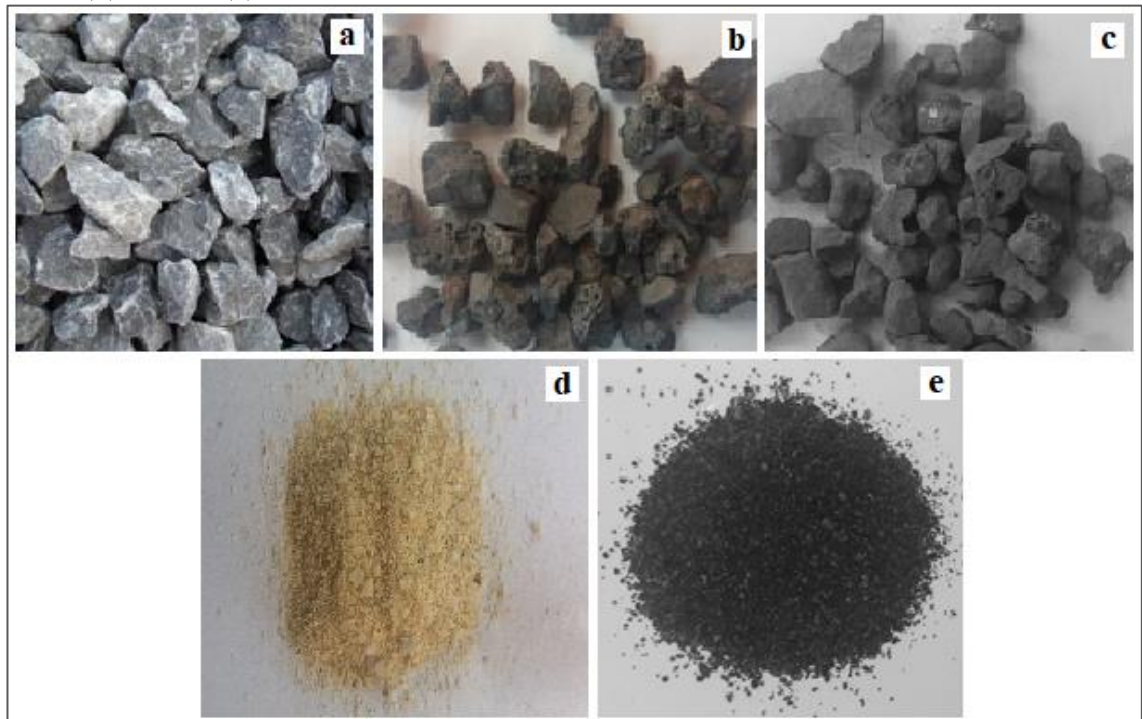
En la figura 43 se muestra la característica visual de cada material utilizado. La figura 43(a) es la grava, la figura 43(b) es escoria de horno de arco eléctrico (EAF) suministrada por Gerdau-Diaco, la figura 43(c) es escoria de horno al oxígeno (BOF) suministrado por Acerías Paz del Río S.A., la figura 43(d) es arena natural obtenida de la cantera la Roca y la figura 43(e) es el polvo de alto horno (BFD) suministrado por Acerías Paz del Río S.A.

Figura 42. Ubicación IncoAsfaltos S.A.



Fuente: El autor a partir de Google Earth Pro y <http://www.incoasfaltos.com>

Figura 43. Característica visual de los materiales (a) Grava, (b) escoria EAF, (c) escoria BOF, (d) Arena, (e) BFD



Fuente: El autor.

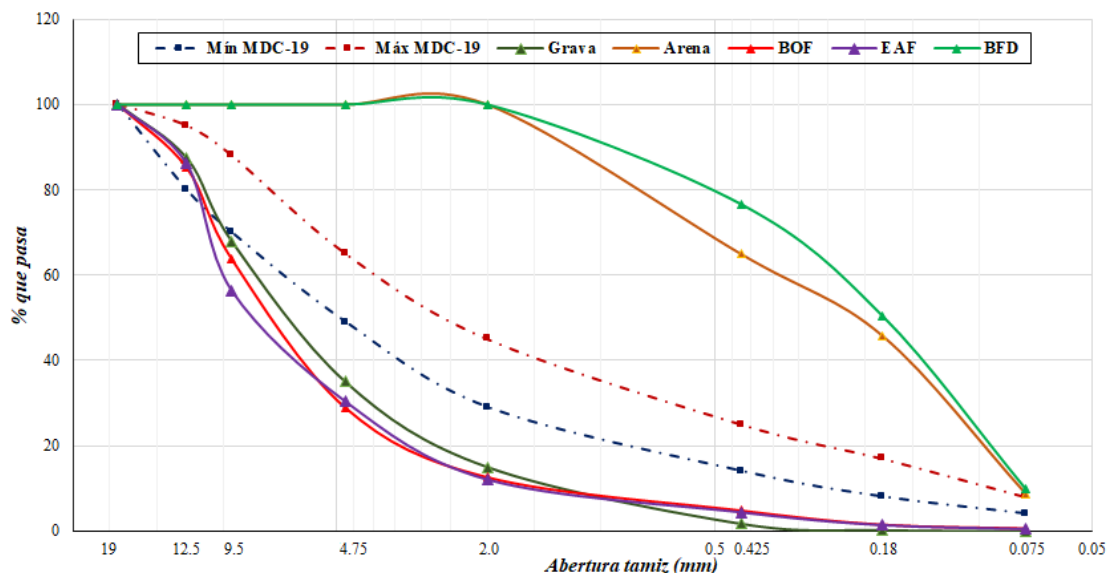
Cada material tiene características y propiedades diferentes, es por esto que se evaluaron de forma individual, con el fin de establecer si son propicios para formar parte de una mezcla asfáltica. En Colombia, el Instituto nacional de Vías establece, en el artículo 450 de 2013 (INVIAS, 2013a), los requisitos que evalúan la calidad del material tanto en las características de consenso como en las de origen.

3.5.2 Granulometría. En la figura 44 se muestra la granulometría de los cinco materiales utilizados y la franja granulométrica de la mezcla MDC-19 de acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013b). Como se observa la granulometría de los tres materiales utilizados como agregado grueso son muy similares, al igual que los dos materiales utilizados como agregado fino.

3.5.3 Resultados de los ensayos de caracterización. Teniendo en cuenta que el agregado juega un papel clave en el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente y con el fin de obtener datos confiables en los resultados de laboratorio, se desarrolló el siguiente procedimiento:

- En los sitios de acopio de cada empresa proveedora del material, se realizó muestreo de acuerdo a la norma INV E-201-13, siguiendo el procedimiento para el muestreo en pilas (INVIAS, 2013e).
- Ya en laboratorio y con el fin de minimizar la variación de las características entre la muestra del ensayo y la muestra grande del material, se realizó el cuarteo de acuerdo a la norma INV E-202-13, siguiendo el procedimiento de cuarteo mecánico (INVIAS, 2013i).
- Cada ensayo se realizó hasta tres veces y el valor reportado es el promedio de los ensayos.

Figura 44. Granulometría de los materiales



Fuente: El autor

3.5.3.1 Caracterización físico-mecánica de los agregados. Los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados gruesos utilizados en la investigación, se muestran en la tabla 11, en donde se presentan los valores obtenidos y los valores requeridos para

mezclas asfálticas en caliente de acuerdo a las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías-INVIAS (INVIAS, 2013a), para un nivel de tránsito NT-3. En el **Anexo A** se presentan los respectivos reportes.

Tabla 11. Resultados caracterización físico-mecánica agregados gruesos

Característica	Resultado			Requerimiento
	Grava	EAF	BOF	
<i>Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)</i>	19.5	17.8	19.8	25
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	19.8	15.9	20.7*	20
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, valor en seco, mínimo (kN)	122.8	117.3	114.8	110
Pérdida en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, máximo (%)	1.6	2.0	1.7	18
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	0.7	0.8	0.02	10
Caras fracturadas, Mínimo (%)	94.1	99.9	99.7	85
Gravedad específica aparente, Gsa	2.757	3.606	2.865	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca, Gss	2.700	3.508	2.738	-
Gravedad específica bulk, Gsb	2.668	3.470	2.670	-
Absorción (%)	1.20	1.09	2.55	-

Fuente: El autor

Los resultados de los ensayos de caracterización de los agregados finos utilizados en la investigación, se muestran en la tabla 12, en donde se presentan los valores obtenidos y los valores requeridos para mezclas asfálticas en caliente de acuerdo a las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías-INVIAS (INVIAS, 2013a), para un nivel de tránsito NT-3.

Tabla 12. Resultados caracterización físico-mecánica agregados finos

Característica	Resultado		Requerimiento
	Arena	BFD	
<i>Índice de plasticidad, máximo (%)</i>	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%)	68.0	93.8	50
Angularidad, mínimo (%)	46.8	53.0	45
Gravedad específica aparente, Gsa	2.779	2.726	-
Gravedad específica saturada superficialmente seca, Gss	2.743	2.496	-
Gravedad específica bulk, Gsb	2.722	2.362	-
Absorción (%)	0.76	5.65	-

Fuente: El autor

En la tabla 13, se presenta el resultado del ensayo realizado para determinar la gravedad específica de las partículas sólidas del llenante mineral.

Los agregados utilizados cumplen los requerimientos de las especificaciones para ser utilizados como materiales en mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 13. Gravedad específica de la llenante mineral

Característica	Resultado
Gravedad específica	2.800

Fuente: El autor

El desgaste en la máquina de los Ángeles de la grava está por debajo del máximo permitido en 5.5 %, mientras que el de la escoria EAF está por debajo en 7.2% y el de BOF en 5.2%. Lo cual indica que son agregados duros y resistentes a la abrasión.

En la prueba de resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval, los resultados están muy cercanos al requerimiento para ser utilizados como materiales en mezclas asfálticas para capas de rodadura. El valor reportado para la grava está por debajo del máximo requerido en 0.2%, el valor para la escoria EAF está por debajo en 4.1% y el de la escoria BOF está por encima del máximo requerido en 0.7%. De los tres materiales el que mejor resistencia a la degradación por abrasión en las condiciones del ensayo es la escoria EAF. La escoria BOF tiene la menor resistencia, el valor reportado incrementa el máximo valor estipulado en una proporción baja (3.5%).

La escoria BOF, aunque cumple el requerimiento de la resistencia a la degradación en la máquina de los Ángeles bajo condiciones secas, cuando está en presencia de agua pierde propiedades de resistencia a la degradación. Es decir, la escoria BOF es un material susceptible a la presencia de agua. Teniendo en cuenta lo anterior y a que el resultado del ensayo está cercano al valor máximo requerido, se determinó continuar con la investigación y la utilización de la escoria BOF como agregado grueso. La incidencia de este valor, se analizó en las pruebas de desempeño de las mezclas que contienen este tipo de escoria.

La grava por ser producto de un proceso de trituración, cumple de forma satisfactoria el criterio de geometría de las partículas, altos porcentajes de caras fracturadas y poca presencia de partículas planas y alargadas. Las escorias EAF y BOF, aunque no son producto de un proceso de trituración, también cumplen los requerimientos de geometría de las partículas.

El ensayo de equivalente de arena se realizó individual para cada uno de los agregados finos (arena y BFD), ambos materiales cumplen el requerimiento. La geometría de los agregados finos se evaluó mediante el ensayo de angularidad, los materiales cumplen ya que la angularidad de la arena es de 46.8% y de BFD es de 53.8%.

Para los materiales utilizados se requiere conocer los diferentes parámetros de gravedad específica, dado que en la metodología Ramcodes es un parámetro importante para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto mediante el polígono de vacíos. Por esto, se realizaron dos ensayos para cada material y se tomó el promedio de los datos obtenidos para su gravedad específica.

3.5.3.2 Caracterización físico-mecánica del cemento asfáltico. Al igual que los agregados, el cemento asfáltico debe cumplir con algunos requerimientos los cuales están

establecidos en el Artículo 410-13 (INVIAS, 2013j) del Instituto Nacional de Vías. En la tabla 14, se presentan los resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico utilizado en la investigación.

Tabla 14. Resultados caracterización cemento asfáltico AC 60-70

Característica	Resultado	Requerimiento	
		Mín.	Máx.
<i>Asfalto original</i>			
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	61.2	60	70
Punto de ablandamiento, °C	49	48	54
Índice de penetración	-0.9	-1.2	+0.6
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min), cm	106	100	-
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	248	230	-
Gravedad específica	1.02	-	-
<i>Asfalto residual, luego de la prueba de película delgada rotatoria (RTFO)</i>			
Pérdida de masa por calentamiento, %	0.22	-	0.8
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	52.3	50	-
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	5.3	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60°C) del asfalto residual y original	1.04	-	4

Fuente: El autor

El cemento asfáltico cumple con los requerimientos establecidos en las especificaciones, la gravedad específica es uno de los parámetros utilizados para la definición de las características volumétricas del concreto asfáltico.

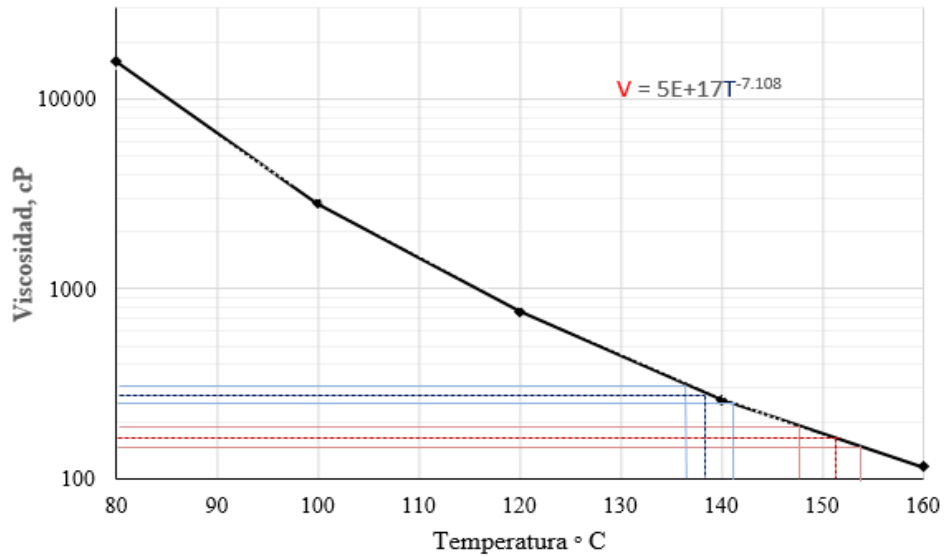
La viscosidad del cemento asfáltico obtenida empleando el viscosímetro rotacional Brookfield, tabla 15, se utiliza para obtener la curva reológica o de susceptibilidad térmica. Con esta curva se obtiene la temperatura de mezclado (viscosidad de 170 ± 20 cP) y de compactación (280 ± 30 cP) del concreto asfáltico. La curva reológica se muestra en la figura 45.

Tabla 15. Viscosidad Brookfield del cemento asfáltico

Temperatura ° C	Viscosidad (cP)			
	1	2	3	Promedio
80	15811	15728	15698	15746
100	2829	2815	2792	2812
120	758	757	757	757
140	262	263	261	262
160	118	115	115	116

Fuente: El autor

Figura 45. Curva reológica cemento asfáltico AC 60-70



Fuente: El autor

La temperatura de mezclado y compactación es de 151°C y 138°C respectivamente.

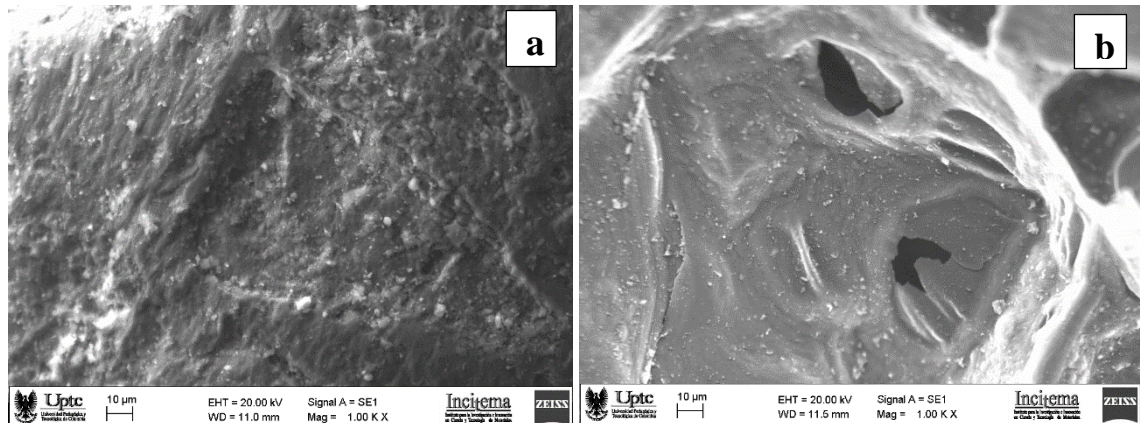
3.5.3.3 Morfología y composición química de los agregados. Las partículas de grava, escorias EAF y BOF, arena y BFD, se sometieron a un examen microscópico para caracterizar su forma y textura superficial. El examen se realizó con el microscopio electrónico de barrido (SEM) Leo 410, con vacío de cámara de $9.85E^{-5}$ Torr, corriente en el filamento de 1.2 nA y voltaje en el ánodo de 15 kV.

La evaluación de la composición química se realizó usando análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), empleando un espectrómetro secuencial Rigaku Primus II con tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras. Este ensayo se realizó en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Con la finalidad de conocer las fases presentes en las escorias EAF y BOF, la grava, la arena y el BFD, se realizó un análisis de difracción de rayos X (XRD). El ensayo se realizó con el equipo marca Panalytical, modelo Empyrean, equipado con un tubo de cobre, usando la configuración óptica Bragg – Brentano, y con un detector de estado sólido de alta velocidad para la adquisición de datos denominado PIXEL 3D 2x2. Se trabajó a un voltaje de aceleración de 45 Kv, una intensidad de corriente de 40 mA, y con un ángulo de barrido (2θ) desde 6.0996° hasta 81.98096° . Este ensayo se basa en la relación que existe entre las intensidades de los picos de difracción de una fase mineralógica definida (agrupación de elementos químicos).

La figura 46 presenta micrografías SEM de los materiales usados como agregado fino, se muestra la forma y textura de la superficie de las partículas de arena y de BFD. La figura 46(a) es la micrografía SEM de la arena, la cual muestra que la textura superficial es áspera y presenta bordes de forma angulosa. La figura 46(b) es la micrografía SEM de BFD, la cual muestra una textura superficial rugosa y porosa con bordes subangulares redondeados, los cuales promueven la absorción de asfalto.

Figura 46. Micrografías SEM de los agregados finos a un aumento de 1.00 KX de (a) arena; (b) BFD.



Fuente: El autor

La figura 47 presenta micrografías SEM de los materiales usados como agregados gruesos, se muestra la forma y textura de la superficie de la grava, escoria EAF y escoria BOF.

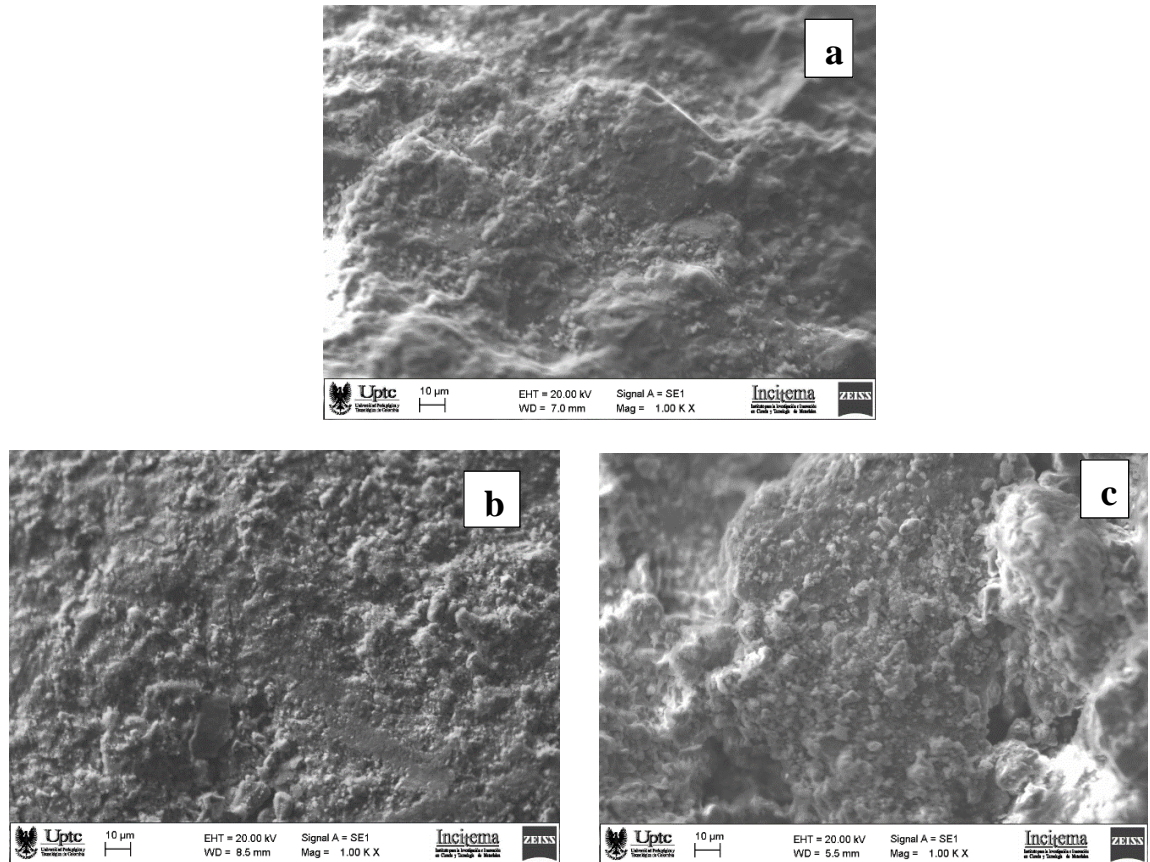
La figura 47(a) es la micrografía SEM de la grava, la textura superficial es áspera, presenta bordes de forma angulosa y subredondeados. La figura 47(b) muestra la micrografía SEM de la escoria EAF, la textura es áspera, presenta bordes subangulares y redondeados. La figura 47(c) es la micrografía SEM de la escoria BOF, la textura igual que las anteriores es áspera, presenta bordes menos angulares y más redondeados, presenta poros superficiales y es más áspera que el agregado natural y que la escoria EAF.

La composición química de las escorias EAF y BOF, la grava, la arena y el BFD detectados por XRF se muestra en la tabla 16. Los principales constituyentes químicos de la grava son CaO , SiO_2 y Al_2O_3 . La escoria EAF tiene una composición similar a la de la escoria BOF. El proceso de fabricación de acero en horno de arco eléctrico es un proceso de reciclaje de chatarra de acero, por lo tanto, la composición química de la escoria EAF depende de las propiedades de la chatarra. La escoria BOF se produce de convertir el arrabio, procedente del alto horno, en acero y la composición química depende la calidad y tipo de acero producido.

La escoria EAF tiene una composición química similar a la de la escoria BOF. Los principales componentes son Fe_2O_3 , CaO , SiO_2 y Al_2O_3 . Las principales diferencias radican en que en la escoria EAF el componente principal es Fe_2O_3 , mientras que en la escoria BOF el principal componente es CaO . Otra diferencia en la composición de las escorias es la presencia de P_2O_5 , el cual está presente en la escoria BOF mientras que no se encontró en la muestra analizada de escoria EAF.

En comparación de la grava con las escorias, el componente principal en la grava es CaO con más del 50%, lo anterior debido a su origen calizo. Aunque Fe_2O_3 también aparece como componente en la grava, el porcentaje en peso es muy inferior en comparación al porcentaje de las escorias.

Figura 47. Micrografías SEM de los agregados gruesos a un aumento de 1.00 KX de (a) grava; (b) escoria EAF; (c) escoria BOF



En cuanto a los agregados finos, el principal constituye químico de la arena es SiO_2 con 88.7% mientras que este mismo compuesto en el BFD es solo del 5.5%. El principal constituyente químico de BFD es Fe_2O_3 con 77.5% mientras que este mismo compuesto en la arena es solo del 0.99%.

Tabla 16. Composición química de los materiales por fluorescencia de rayos X

Componente (% en peso)	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Otros
<i>Agregado grueso</i>								
Grava	3.80	9.30	16.60	-	63.40	0.17	3.04	3.63
Escoria EAF	3.70	6.10	11.00	-	28.60	5.99	42.10	2.41
Escoria BOF	2.70	4.90	10.80	2.10	46.80	2.00	28.80	1.73
<i>Agregado fino</i>								
Arena	1.60	7.30	88.70	-	0.46	-	0.99	1.00
BFD	1.00	3.60	5.50	0.20	4.95	3.32	77.50	0.90

Fuente: El autor

La relación CaO/SiO_2 considera el nivel de alcalinidad del agregado, relaciones altas conducen a una afinidad mayor entre el agregado y el cemento asfáltico (Xie et al., 2012). La escoria EAF presenta una relación CaO/SiO_2 de 2.6, más baja que la relación en la grava que es de 3.8. La escoria BOF presenta una relación CaO/SiO_2 de 4.3, más alta que

la relación de la grava. En consecuencia, la escoria BOF tiene mejor afinidad con el cemento asfáltico que la escoria EAF. De la misma forma, el BFD tiene una relación CaO/SiO₂ de 0,9, mientras que la arena presenta una relación de 0.005. Por consiguiente, el BFD tiene una afinidad más fuerte con el cemento asfáltico que la arena.

De acuerdo con los resultados es más evidente la diferencia entre los agregados finos (arena y BFD) que entre los agregados gruesos (grava, escoria EAF y escoria BOF).

La tabla 17 muestra la composición química de escoria EAF y escoria BOF de varias fuentes y la tabla 18 muestra la composición química de polvo de alto horno (BFD) de varias fuentes, con el interés de comparar la composición química de residuos siderúrgicos utilizados en esta investigación

Tabla 17. Comparativo de composición química de EAF y BOF, con otros autores

Referencia	País	Composición (% en peso)							
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Otros
Escoria EAF									
1*	Colombia	3.70	6.10	11.00	-	28.60	5.99	42.10	2.41
(Tossavainen et al., 2007)	Suecia	3.90	6.70	14.10	-	38.80	5.00	20.30	11.20
(Manso et al., 2006)	España	5.10	7.40	15.30	-	23.90	4.50	42.50	1.30
(Adegoloye et al., 2016)	Francia	9.06	6.26	34.76	-	41.73	2.15	-	6.04
(Fakhri & Ahmadi, 2017b)	Irán	5.00	5.00	16.00	-	40.00	1.00	27.00	6.00
(Autelitano & Giuliani, 2016)	Italia	2.53	5.80	18.90	-	18.28	2.55	37.71	14.2
(Fuente-Alonso et al., 2017)	España	2.50	13.70	19.10	-	27.70	5.30	26.80	4.90
Escoria BOF									
1*	Colombia	2.70	4.90	10.80	2.10	46.80	2.00	28.80	1.73
(Xie et al., 2012)	China	5.19	3.25	19.24	1.41	42.70	1.77	24.55	1.52
(Das et al., 2007)	India	0.82	1.22	12.16	3.33	47.88	0.28	26.30	7.9
(D. H. Shen et al., 2009)	Taiwán	8.56	0.98	7.75	-	39.30	4.24	38.06	1.11
(Mahieux et al., 2009)	Francia	6.30	2.00	11.80	2.70	47.50	1.90	22.60	5.20
(Waligora et al., 2010)	Francia	6.37	3.04	13.25	1.47	47.71	2.64	24.36	1.16
(Poh et al. 2006)	UK	8.06	4.35	15.26	1.15	41.44	5.20	9.24	15.3
(Juckes, 2017)	UK	7.76	0.99	11.99	1.15	43.54	2.98	20.37	11.22

Nota: 1* Escoria EAF y BOF utilizadas en esta investigación

Fuente: El Autor.

Tabla 18. Comparativo de composición química de BFD, con otros autores

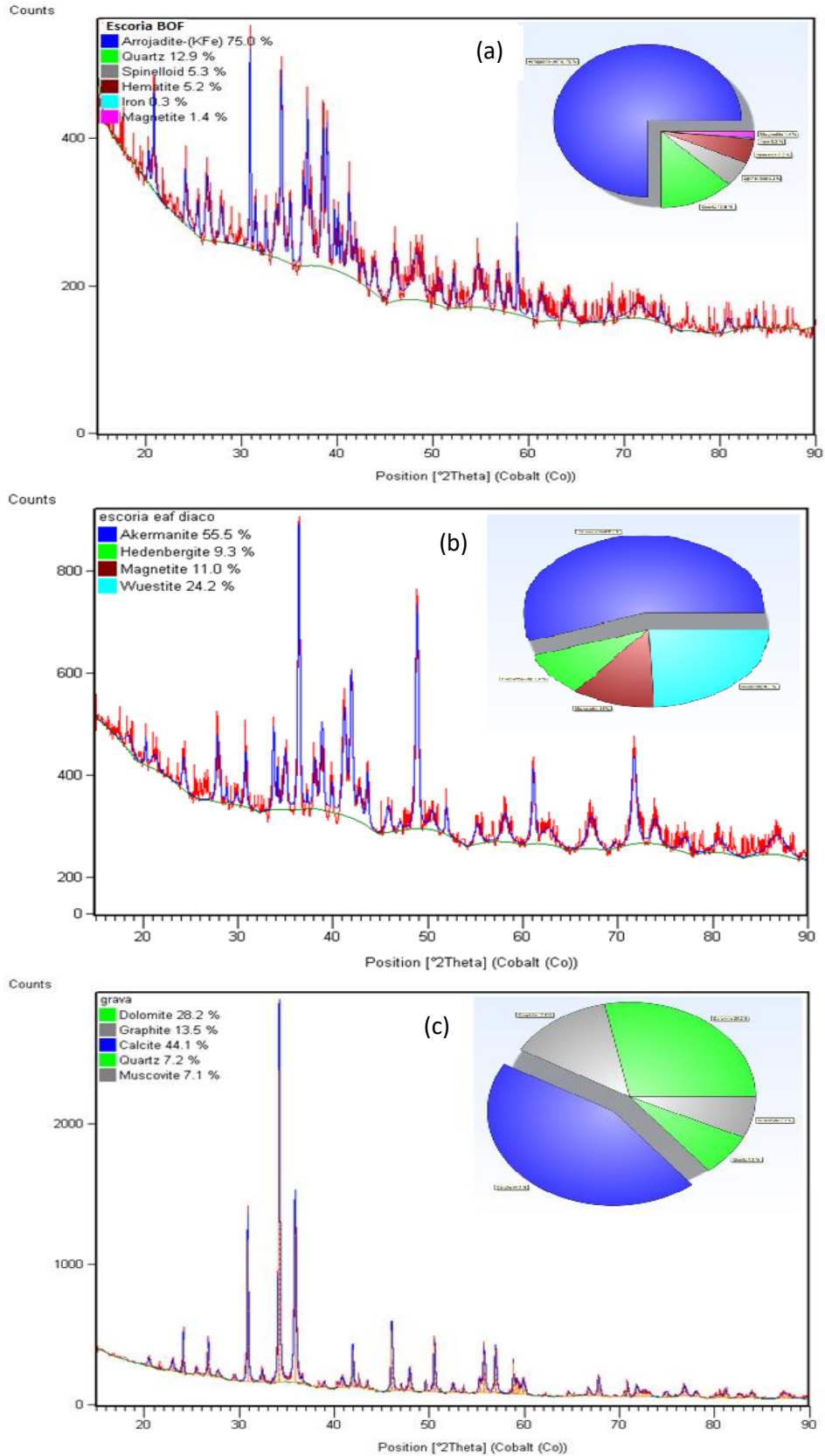
Referencia	País	Composición (% en peso)							
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃	Otros
2*	Colombia	1.00	3.60	5.50	0.20	4.95	3.32	77.50	0.90
(Zeydabadi et al., 1997)	Irán	5.35	2.21	9.42	-	17.2	0.67	30.00	35.15
(W. tao Hu et al., 2018)	China	0.45	2.93	5.01	0.13	3.07	0.11	37.91	50.39
(Rath et al., 2018)	India	1.29	3.87	8.01	0.37	4.52	0.04	32.13	49.87
(Das et al., 2002)	India	1.55	2.54	8.30	-	1.96	0.20	50.93	34.52

Nota: 2* Polvo de alto horno (BFD) utilizado en esta investigación

Fuente: El Autor

La aplicación de la técnica de difracción de rayos X (XRD) permitió cuantificar las fases que conforman los materiales utilizados. En la figura 48 se muestra los difractogramas de los materiales utilizados como agregado grueso (escoria BOF, escoria EAF y grava).

Figura 48. Difractogramas para (a) escoria BOF, (b) escoria EAF, (c) grava

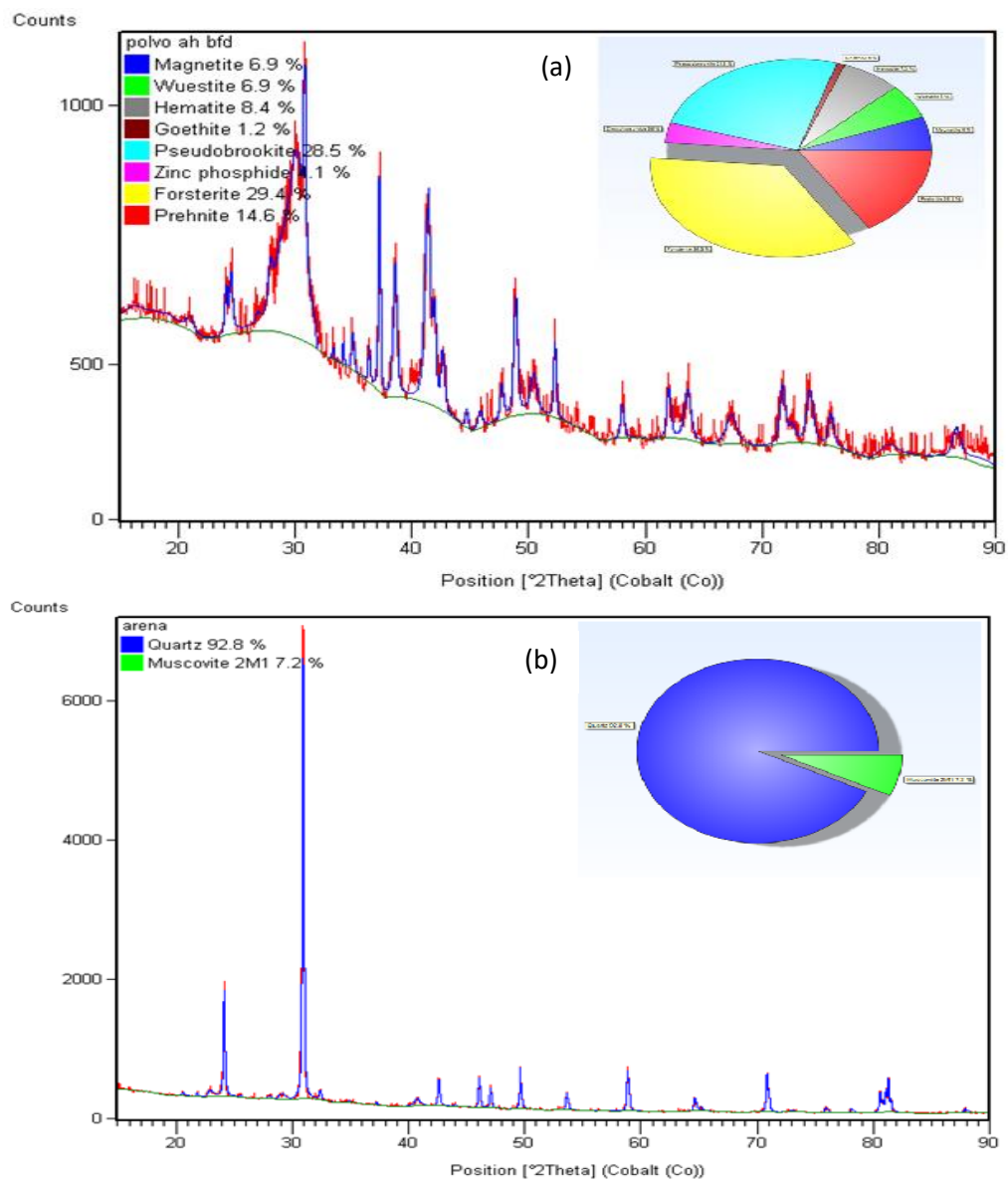


Fuente: El autor

La muestra de escoria BOF presentó tres fases principales: arrojadita (KFe), cuarzo (SiO_2) y hematita (Fe_2O_3); también se observó un pico correspondiente a magnetita (Fe_3O_4). La muestra de escoria EAF presentó tres fases principales: Akermanita ($\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$), wustita (FeO) y magnetita (Fe_3O_4). La muestra de grava presentó tres fases principales: calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y grafito (C); también se observó picos correspondientes a Cuarzo (SiO_2) y moscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$).

En la figura 49 se muestra los difractogramas de los materiales utilizados como agregado fino (arena y BFD).

Figura 49. Difractogramas para (a) BFD, (b) arena



Fuente: El autor

La muestra de BFD presentó las siguientes fases principales: forsterita (Mg_2SiO_4), prehnita ($Ca_2Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$) y óxido de titanio de hierro (Fe_2TiO_5); también se observó picos correspondientes a magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) y wustita (FeO). La muestra de arena presentó dos fases principales: cuarzo (SiO_2) y moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$).

En la tabla 19 se comparan los compuestos mayoritarios de los materiales utilizados como agregado grueso.

Tabla 19. Compuestos mayoritarios identificados con XRD en los agregados gruesos

Muestra	Arrojadita KFe	Cuarzo SiO ₂	Hematita Fe ₂ O ₃	Magnetita Fe ₃ O ₄	Akematita Ca ₂ Mg	Wustita FeO	Dolomita CaMg(CO ₃) ₂	Calcita Ca(CO ₃)	Moscovita KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Grafito C
Escoria BOF	75.0	12.9	5.2	1.4						
Escoria EAF				11.0	55.5	24.2				
Grava		7.2					28.2	44.1	7.1	13.5

Fuente: El autor

En la tabla 20 se comparan los compuestos mayoritarios de los materiales utilizados como agregado fino.

Tabla 20. Compuestos mayoritarios identificados con XRD en los agregados finos

Muestra	Forsterita Mg ₂ SiO ₄	Óxido Ti-Fe Fe ₂ TiO ₅	Hematita Fe ₂ O ₃	Magnetita Fe ₃ O ₄	Prehnita Ca ₂ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Wustita FeO	Fosforo de Zn Zn ₃ P ₂	Cuarzo SiO ₂	Moscovita KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂
BFD	29.4	28.5	8.4	6.9	14.6	6.9	4.1		
Arena								92.8	7.2

Fuente: El autor

La identificación de las fases encontradas en las escoria BOF utilizada en este trabajo, concuerda con lo reportado en trabajos de investigación similares y en específico los trabajos de [Waligora et al., \(2010\)](#) y [Mahieux et al., \(2009\)](#) quienes identificaron magnetita (Fe_3O_4) y cuarzo (SiO_2). En estos mismos estudios también identificaron calcita ($CaCO_3$) y Cal (CaO) las cuales no fueron identificadas en la muestra analizada de la escoria BOF utilizada en este trabajo.

En la escoria EAF utilizada en este trabajo se identificaron fases similares a las reportadas por otros investigadores como es el caso de [Delvasto et al., \(2011\)](#) quien identificó magnetita (Fe_3O_4) y wustita (FeO). En contraste con [Shawabkeh, \(2010\)](#) quien encontró óxido de zinc (ZnO) y ferrita (Fe_2O_4).

En las investigaciones de [D. Zhang et al., \(2017\)](#) y [T. Hu et al., \(2017\)](#) identificaron las fases de wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4) en el BFD al igual que en la muestra analizada en este trabajo.

3.6 DISEÑO DE LAS MEZCLAS

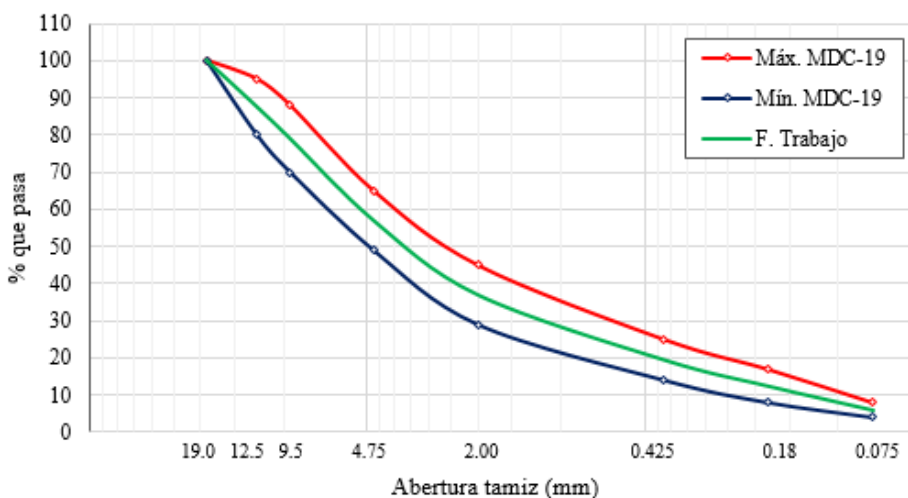
En esta etapa se realizó el diseño en laboratorio de las mezclas asfálticas siguiendo la metodología Ramcodes. Como se indicó anteriormente, la mezcla de diseño para llevar a cabo el estudio es una mezcla densa en caliente Tipo 19 (MDC-19), de acuerdo a la especificaciones del Instituto Nacional de Vías-INVIAS (INVIAS, 2013b). Los trabajos de laboratorio consistieron en el diseño de las once fórmulas de trabajo.

La estructura del agregado seleccionada para el estudio fue la que pasa por el punto medio de la franja granulométrica, figura 50. Lo anterior, para poder darle repetitividad a la preparación de las mezclas y elaboración de ensayos.

En esta etapa se realizó el diseño en laboratorio de las mezclas asfálticas siguiendo la metodología Ramcodes. Como se indicó anteriormente, la mezcla de diseño para llevar a cabo el estudio es una mezcla densa en caliente Tipo 19 (MDC-19), de acuerdo a la especificaciones del Instituto Nacional de Vías-INVIAS (INVIAS, 2013b). Los trabajos de laboratorio consistieron en el diseño de las once fórmulas de trabajo.

La estructura del agregado seleccionada para el estudio fue la que pasa por el punto medio de la franja granulométrica, figura 50. Lo anterior, para poder darle repetitividad a la preparación de las mezclas y elaboración de ensayos.

Figura 50. Granulometría de trabajo MDC-19



Fuente: El autor

Los requerimientos que deben cumplir las mezclas diseñadas serán las establecidas en el Artículo 450-13 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013b), para un nivel de tránsito NT3. Estos requerimientos se muestran en la tabla 19.

La compactación de las probetas para diseño se realizó con el compactador giratorio, figura 51, siguiendo los requerimientos de compactación Superpave. Esta compactación

trata de simular la compactación realizada en campo, procurando orientar las partículas de igual manera que cuando esta se compacta mediante amasado por rodillo bajo las mismas condiciones de carga, aunque en tiempos diferentes. La prueba dura menos de cinco minutos en la cual, el espécimen de 102 mm de diámetro por una altura de 64 mm es compactado bajo una presión de 600 ± 18 kPa, con ángulo de giro de $1.16^\circ \pm 0.02^\circ$ y una velocidad de 30 ± 0.5 giros por minuto.

Tabla 21. Requerimientos mezclas asfálticas

Característica	Requerimiento
Estabilidad mínima (N)	9000
Flujo, (mm)	2.0 – 3.5
Relación: Estabilidad/flujo (kN/mm)	3.0 - 6.0
Vacíos con aire (Va) (%)	4.0 – 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM) (%)	>15.0
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)	65 - 75
Relación: Llenante/ligante efectivo (En peso)	0.8 – 1.2
Desempeño de las mezclas	
Susceptibilidad a la humedad (%)	> 80
Resistencia a la deformación plástica ($\mu\text{m}/\text{mín}$)	20
Módulo resiliente (MPa)	Reportar
Leyes de fatiga	Reportar

Fuente: El autor en base a Art. 450-13 INVIAS

Un aspecto importante es que el número de giros ($N_{\text{diseño}}$) está en función del tránsito, con lo cual indiscutiblemente las propiedades volumétricas del espécimen serán diferentes respecto al número de giros que se emplee. La tabla 22 muestra los requerimientos de compactación Superpave. Estos requerimientos están formulados para probetas de 115 mm de altura y 150 mm de diámetro.

Figura 51. Compactador giratorio y molde de compactación.



Fuente: El autor

Tabla 22. Requerimientos de compactación Superpave.

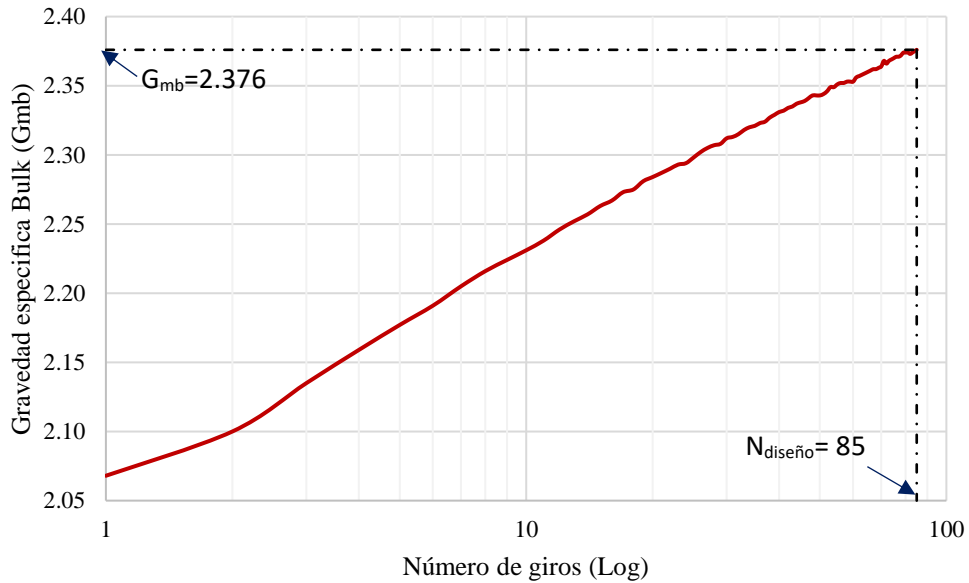
Número de ejes equivalentes de diseño	Número de giros en el compactador giratorio		
	N inicial	N diseño	N máximo
ESAL's 3.0×10^5	6	50	75
$3.0 \times 10^5 < \text{ESAL's} < 3.0 \times 10^6$	7	75	115
$3.0 \times 10^6 < \text{ESAL's} < 3.0 \times 10^7$	8	100	160
ESAL's $\geq 3.0 \times 10^7$	9	125	205

Fuente: Asphalt Institute, 2001

Al aplicar los 100 giros sugeridos en la tabla 22, a las probetas utilizadas en esta investigación, no se obtenía la densidad deseada. Lo anterior, teniendo en cuenta que las probetas son de 64 mm de altura y 102 mm de diámetro y después de un número determinado de giros sumado a la sobrecompactación, se presentaba un fenómeno de expansión en la mezcla.

Después de muchos intentos, se determinó que, para alcanzar la densidad deseada en este tipo de probetas, el número de giros para diseño es de 85. Como se puede ver en la curva de compactación de la mezcla M-1, figura 52. En consecuencia, para el nivel de tránsito NT3 (ESAL's $> 5.0 \times 10^6$), considerado en el estudio, se aplicaron 85 giros en la compactación de los especímenes de diseño.

Figura 52. Curva de compactación de la mezcla de control (M-1)



Fuente: El autor

Definidos los parámetros de granulometría, proceso de compactación y requerimientos a cumplir con las mezclas asfálticas a diseñar y conociendo las características de los materiales a utilizar, se continuó con el diseño siguiendo los pasos recomendados por la metodología Ramcodes.

3.6.1 Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico. La estimación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizó con la ayuda del polígono de vacíos. Para poder aplicar este concepto es necesario realizar unas actividades previas que se describen a continuación:

3.6.1.1 Cálculo de la gravedad específica aparente (G_{sa}) y neta o bulk (G_{sb}) de la combinación de agregados. Como el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso; agregado fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas. La gravedad específica neta y aparente para el agregado total se calculó utilizando la ecuación 25. Los resultados se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Gravedades específicas de la combinación de agregado.

ID Mezcla	Gravedad específica	
	Gsa	Gsb
M-1	2.764	2.687
M-2	2.793	2.638
M-3	2.825	2.595
M-4	2.998	2.859
M-5	3.303	3.086
M-6	2.942	2.783
M-7	3.040	2.812
M-8	3.006	2.920
M-9	3.294	3.195
M-10	2.758	2.634
M-11	2.751	2.584

Gsa: Gravedad específica aparente, Gsb: Gravedad específica neta (Bulk)

Fuente: El autor

3.6.1.2 Determinación de la gravedad específica efectiva (G_{se}). Para determinar la gravedad específica efectiva (G_{se}) de los agregados, fue necesario determinar la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}), figura 53. El valor de G_{mm} se calculó con el ensayo de laboratorio de acuerdo a la norma INV E-735-13/ASTM D2041 (INVIAS, 2013d)(ASTM, n.d.-b) y el valor de G_{se} se determinó con la ecuación 26. Los resultados de G_{mm} y G_{se} se muestran en la tabla 24.

Teniendo los valores de gravedad específica de las mezclas, es necesario verificar la desigualdad $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$. Si no se cumple, hay que revisar los resultados y hasta volver a realizar los ensayos. Si cumple, se sigue el procedimiento para determinar el contenido óptimo de asfalto con ayuda del polígono de vacíos. La verificación se muestra en la tabla 25. Como se observa en todas las mezclas se cumple el requerimiento.

Tabla 24. Valores de G_{mm} y G_{se} para diseño.

ID Mezcla	Ensayo Rice para G_{mm}		G_{se}
	Pb (%)	G_{mm}	
M-1	6.0	2.460	2.704
M-2	6.0	2.520	2.751
M-3	6.0	2.500	2.755
M-4	5.0	2.640	2.881
M-5	5.5	2.867	3.205
M-6	6.0	2.550	2.820
M-7	6.0	2.650	2.951
M-8	4.5	2.723	2.956
M-9	5.5	2.891	3.237
M-10	6.0	2.460	2.704
M-11	5.0	2.480	2.682

Pb: Contenido de cemento asfáltico, G_{mm} : Gravedad específica máxima teórica, G_{se} : Gravedad específica efectiva

Fuente: El autor

Figura 53. Ensayo Rice para determinar la gravedad específica máxima teórica, G_{mm}



Fuente: El autor

Tabla 25. Verificación de desigualdad gravedades específicas

ID Mezcla	Verificación				
	G_{sa}		G_{se}		G_{sb}
M-1	2.764	>	2.704	>	2.687
M-2	2.793	>	2.781	>	2.638
M-3	2.825	>	2.755	>	2.595
M-4	2.998	>	2.881	>	2.859
M-5	3.303	>	3.205	>	3.086
M-6	2.942	>	2.820	>	2.783
M-7	3.040	>	2.951	>	2.812
M-8	3.006	>	2.956	>	2.920
M-9	3.294	>	3.237	>	3.195
M-10	2.758	>	2.704	>	2.634
M-11	2.751	>	2.682	>	2.584

G_{sa} : Gravedad específica aparente, G_{se} : Gravedad específica efectiva, G_{sb} : Gravedad específica neta (Bulk)

Fuente: El autor

Para obtener el polígono de vacíos es necesario conocer los siguientes parámetros: Gravedad específica aparente (G_{sa}) y gravedad específica efectiva (G_{se}) de la combinación de agregados, gravedad específica del asfalto (G_b) y los requerimientos de vacíos que deben cumplir las mezclas por diseñar.

3.6.2 Obtención de la fórmula de trabajo. Calculado el contenido óptimo de asfalto, se mezclaron la combinación de agregados y se compactaron tres probetas bajo la energía de compactación seleccionada. Se midieron los diámetros y espesores de cada una, figura 54.

Posteriormente, se determinó la gravedad específica bulk (peso específico Bulk) de cada probeta de acuerdo con el método de prueba INV E-733-13/ASTM D2726 (INVIAS, 2013c)(ASTM, n.d.-a), figura 54. En este momento se verificó que el promedio del contenido de asfalto y la densidad bulk de las tres probetas está dentro del polígono de vacíos. Si lo anterior no ocurría era necesario descartar la combinación de agregados, seleccionar otra y volver a iniciar con el diseño.

Figura 54. Ensayo gravedad específica bulk de probetas compactadas.



Fuente: El autor

Las probetas fueron ensayadas para determinar su estabilidad y flujo de acuerdo con el método de prueba INV E-748-13/ASTM D6926/ASTM D6927, figura 55. De igual forma, se verificó que el promedio de estabilidad y flujo de las tres probetas cumplieran con los requerimientos de las especificaciones. Si no cumplía, se variaba el porcentaje de asfalto en pequeñas proporciones (de acuerdo a la recomendación del Ingeniero Freddy Sánchez Leal) y se volvía a elaborar nuevamente tres probetas y se realizaba los respectivos ensayos. Si con esta variación en el contenido de asfalto, algunos de los parámetros verificados no cumplen, se rechaza la combinación de agregados, se selecciona otra y se vuelve a iniciar con el diseño.

Figura 55. Ensayo Estabilidad y flujo Marshall.

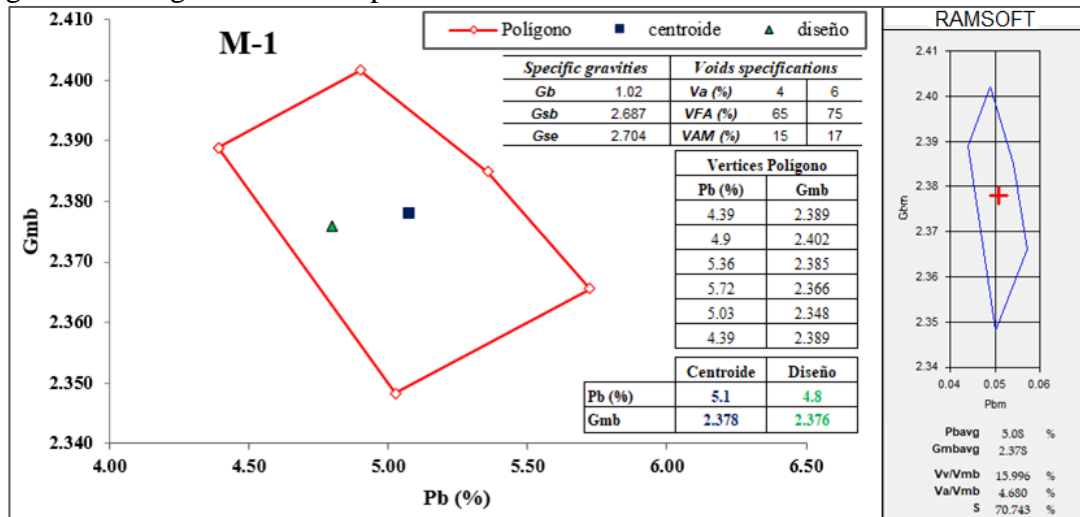


Fuente: El autor

3.6.2.1 Resultados del polígono de vacíos. Para la construcción del polígono de vacíos se utilizó una hoja de cálculo, sin embargo, se verificó el resultado con el software RAMSOFT de Ramcodes.

La figura 56 presenta el polígono de vacíos para la mezcla M-1, la cual muestra los datos de entrada, las coordenadas de los vértices, la coordenada del centroide que define el contenido óptimo teórico de ligante para la combinación de agregados establecida y el resultado de RAMSOFT. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 5.1% y una gravedad específica bulk (G_{mb}) de 2.378.

Figura 56. Polígono de vacíos para la mezcla M-1



Fuente: El autor, con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

Siguiendo los pasos de Ramcodes, con el contenido óptimo de asfalto y la combinación de agregados se elaboraron tres probetas. A las cuales se les realizaron los ensayos descritos en apartes anteriores. El promedio de los resultados obtenidos en los ensayos,

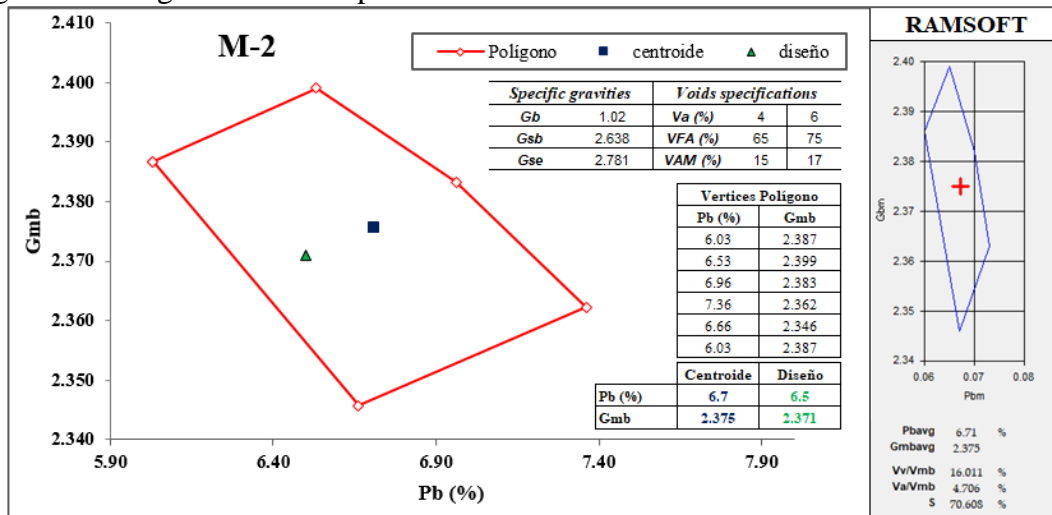
mostró que el valor de flujo (3.6 mm) no cumplía el requerimiento para el nivel de tránsito especificado (2.0 a 3.5 mm). Teniendo en cuenta la recomendación del Ingeniero Freddy Sánchez (Sánchez-Leal, 2018) y considerando que el valor de flujo está muy cerca del límite superior del requerimiento, se realizó un nuevo intento bajando el contenido de asfalto a 4,8 % y con la misma combinación de agregados, se fabricaron tres nuevas probetas.

Este contenido de asfalto y el resultado de G_{mb} se muestran en la figura 56 como diseño, los cuales están dentro del polígono. Las características y los resultados del diseño preliminar obtenidos de la mezcla M-1 se muestran en la tabla 26.

La figura 57 presenta el polígono de vacíos para la mezcla M-2. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 6.7% y una gravedad específica bulk de 2.375.

Los promedios de los resultados de las probetas elaboradas con este contenido de asfalto dieron un flujo de 3.73 mm. El cual está levemente superior al límite del requerimiento, por lo cual, se disminuyó a 6.5% de asfalto y con la misma combinación de agregados se elaboraron nuevamente tres probetas. El resultado se muestra en la figura 57 como diseño y se encuentra dentro del polígono de vacíos. Con este contenido de asfalto cumple el flujo y demás requerimientos del diseño preliminar, los cuales se muestran en la tabla 26. En esta tabla también se muestran los resultados de la mezcla base M-1, con el objetivo de iniciar la comparación de los resultados.

Figura 57. Polígono de vacíos para la mezcla M-2



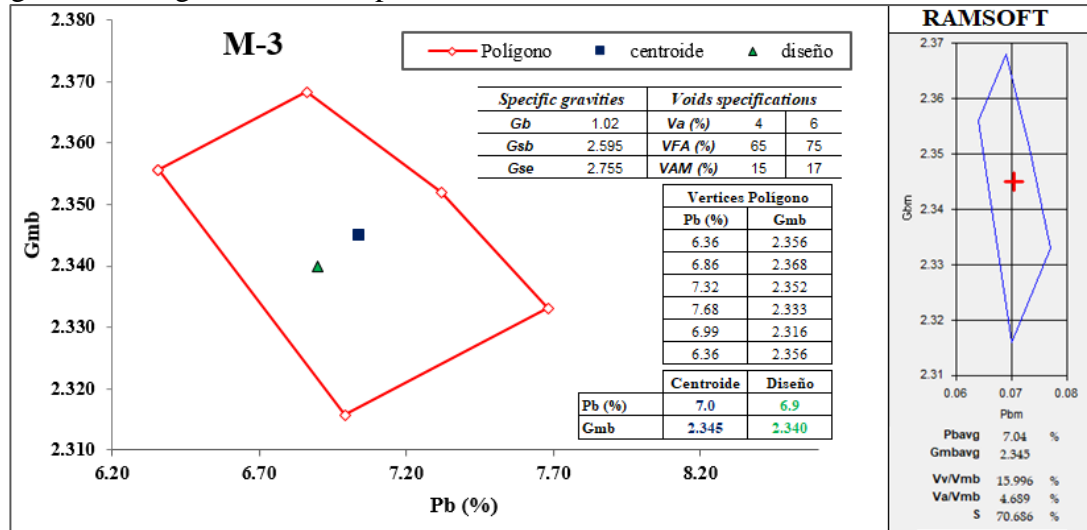
Fuente: El autor, con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

En la figura 58 se observa el polígono de vacíos para la mezcla M-3. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 7.0% y una gravedad específica bulk de 2.345. Los promedios de los resultados de las probetas elaboradas con este contenido de asfalto se obtuvo el valor de flujo de 3.96 mm, el cual es superior al límite del requerimiento. Por lo cual, se disminuyó a 6.9% de asfalto y con la misma combinación de agregados se elaboraron nuevamente tres probetas. El resultado se muestra en la figura 58 como diseño

y se encuentra dentro del polígono de vacíos. Con este contenido de asfalto cumple el flujo y demás requerimientos del diseño preliminar, los cuales se muestran en la tabla 26.

Comparando los resultados de la mezcla base (M-1) con las mezclas diseñadas con escoria BOF como agrado grueso y BFD como agregado fino (M-2 y M-3), se observó un aumento gradual en el contenido de asfalto a medida que se aumentó el contenido de escoria BOF y BFD. Lo que se puede atribuir a la porosidad de la escoria BOF y del BFD, ratificado con el porcentaje de asfalto absorbido. El asfalto efectivo es levemente superior en las mezclas M-2 y M-3, a lo cual se le puede atribuir el aumento en el valor del flujo. La estabilidad en los tres casos es superior al mínimo exigido en los requerimientos. En cuanto a las propiedades volumétricas, las tres mezclas presentan valores similares que cumplen con los requerimientos establecidos.

Figura 58. Polígono de vacíos para la mezcla M-3



Fuente: El autor, con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

Tabla 26. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-2 y M-3

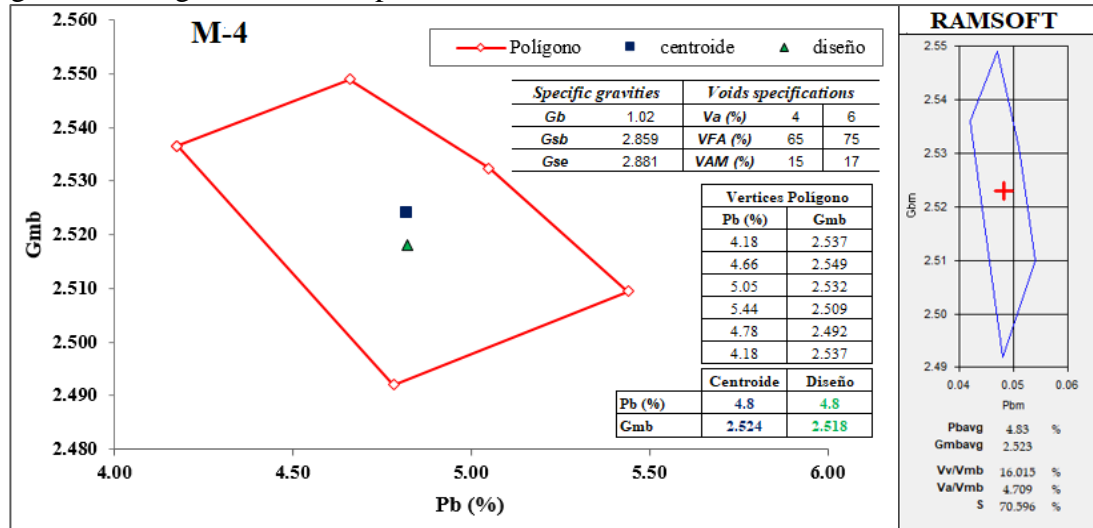
Característica	Unidad	Valor			Requerimiento (Art. 450-13) INVIAS
		M-1	M-2	M-3	
Contenido de agregado (en peso)	%	95.2	93.5	93.1	-
Contenido de asfalto (en peso)	%	4.8	6.5	6.9	-
Gravedad específica bulk (G_{mb})	g/cm^3	2.376	2.371	2.340	-
Gravedad espec. máxima teórica (G_{mm})	g/cm^3	2.510	2.500	2.470	-
Estabilidad	N	11967	10561	11372	9000
Flujo, (mm)	mm	3.35	3.45	3.48	2.0 – 3.5
Relación: Estabilidad/flujo	kN/mm	3.57	3.03	3.27	3.0 – 6.0
Vacíos con aire (V_a)	%	5.15	5.19	5.10	4.0 – 6.0
Vacíos en agregados minerales (VAM)	%	15.80	15.97	16.05	>15.0
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	%	67.42	67.51	68.23	65 – 75
Asfalto absorbido (P_{ba})	%	0.24	1.99	2.28	-
Asfalto efectivo (P_{be})	%	4.57	4.64	4.77	-
Relación: Llenante/ligante efectivo	-	1.10	1.10	1.00	0.8 – 1.2

Fuente: El autor

La figura 59 presenta el polígono de vacíos para la mezcla M-4, la cual muestra los datos de entrada, las coordenadas de los vértices, la coordenada del centroide que define el contenido óptimo teórico de ligante para la combinación de agregados establecida y el resultado de RAMSOFT. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 4.8 % y una gravedad específica bulk de 2.524.

Los promedios de los resultados de los ensayos realizados a las probetas elaboradas con este contenido de asfalto cumplieron todos los requerimientos del diseño preliminar. El valor del promedio de la gravedad específica bulk fue de 2.518 y el contenido de asfalto de 4.8%, esta coordenada se observa en la figura 59 como diseño, la cual se encuentra dentro del polígono de vacíos. Los resultados del diseño preliminar se muestran en la tabla 27.

Figura 59. Polígono de vacíos para la mezcla M-4



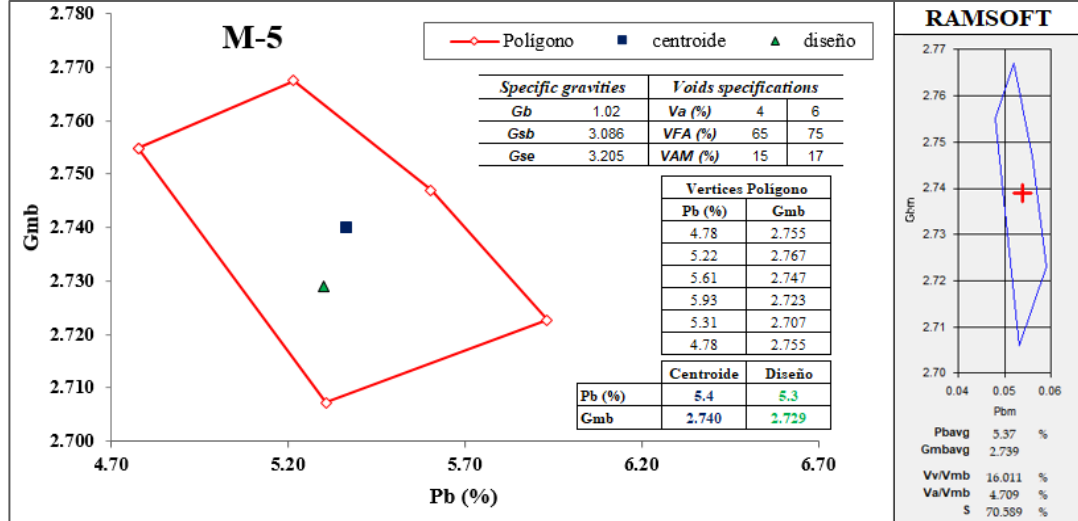
Fuente: El autor con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

En la figura 60 se puede ver el polígono de vacíos para la mezcla M-5. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 5.4% y una gravedad específica bulk de 2.740. Los promedios de los resultados de las probetas elaboradas con este contenido de asfalto dieron un flujo de 3.87 mm, el cual es superior al límite del requerimiento. Por lo cual, se disminuyó a 5.3% de asfalto y con la misma combinación de agregados se elaboraron nuevamente tres probetas. El resultado se muestra en la figura 60 como diseño y se encuentra dentro del polígono de vacíos. Con este contenido de asfalto cumple el flujo y demás requerimientos del diseño preliminar, los cuales se muestran en la tabla 25.

De la tabla 27, la cual compara los resultados de la mezcla base (M-1) con las mezclas diseñadas con escoria EAF como agregado grueso y BFD como agregado fino, se puede observar el aumento en el contenido de asfalto a medida que aumenta la proporción de EAF y BFD. El aumento no es tan significativo como en las mezclas M-2 y M-3, lo que puede ser atribuido a la menor porosidad de la escoria EAF. La escoria BOF presenta mayor porosidad aparente que la escoria EAF, ratificado con el valor de asfalto absorbido. La estabilidad en los tres casos es superior al mínimo exigido en los requerimientos. En

cuanto a las propiedades volumétricas, las tres mezclas presentan valores similares que cumplen con los requerimientos establecidos.

Figura 60. Polígono de vacíos para la mezcla M-5



Fuente: El autor, con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

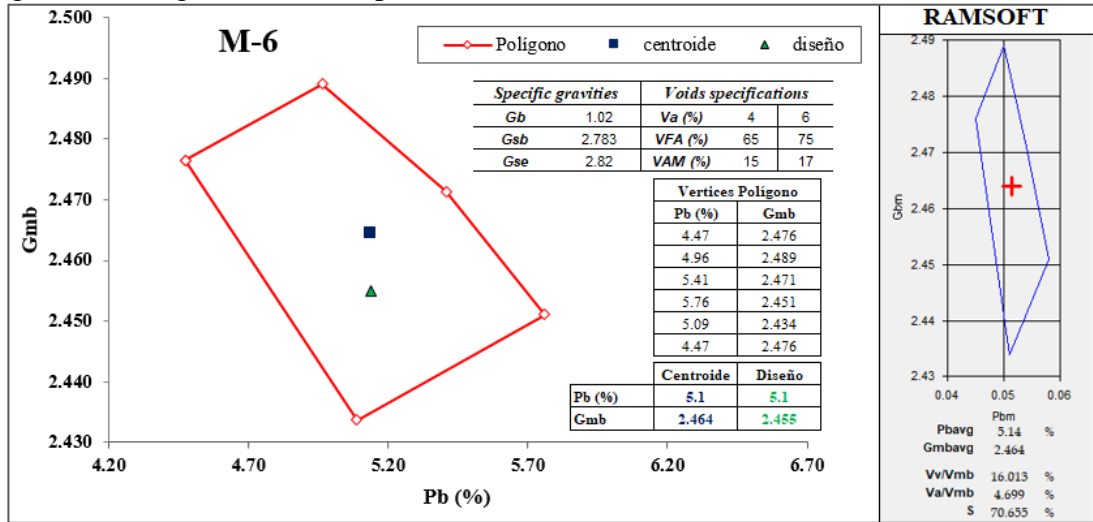
Tabla 27. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-4 y M-5

Característica	Unidad	Valor			Requerimiento (Art. 450-13) INVIAS
		M-1	M-4	M-5	
Contenido de agregado (en peso)	%	95.2	95.2	94.7	-
Contenido de asfalto (en peso)	%	4.8	4.8	5.3	-
Gravedad específica bulk (G_{mb})	g/cm^3	2.376	2.518	2.729	-
Gravedad espec. máxima teórica (G_{mm})	g/cm^3	2.510	2.650	2.880	-
Estabilidad	N	11967	12258	11465	9000
Flujo, (mm)	mm	3.35	3.46	3.48	2.0 - 3.5
Relación: Estabilidad/flujo	kN/mm	3.57	4.67	3.29	3.0 - 6.0
Vacíos con aire (V_a)	%	5.15	4.94	5.18	4.0 - 6.0
Vacíos en agregados minerales (VAM)	%	15.80	16.17	16.26	>15.0
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	%	67.42	69.43	68.16	65 - 75
Asfalto absorbido (P_{ba})	%	0.24	0.27	1.22	-
Asfalto efectivo (P_{be})	%	4.57	4.55	4.14	-
Relación: Llenante/ligante efectivo	-	1.10	1.10	1.20	0.8 - 1.2

Fuente: El autor

La figura 61 muestra el polígono de vacíos para la mezcla M-6, la cual muestra los datos de entrada, las coordenadas de los vértices, la coordenada del centroide que define el contenido óptimo teórico de ligante para la combinación de agregados establecida y el resultado de RAMSOFT. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 5.1 % y una gravedad específica bulk de 2.464.

Figura 61. Polígono de vacíos para la mezcla M-6



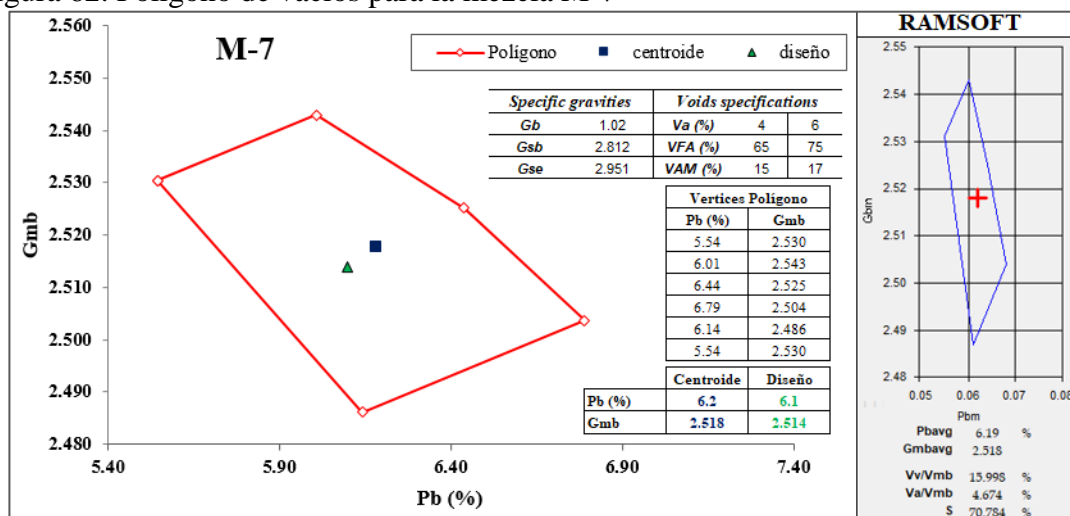
Fuente: El autor con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

Los promedios de los resultados de los ensayos realizados a las probetas elaboradas con este contenido de asfalto cumplieron todos los requerimientos del diseño preliminar. El valor del promedio de la gravedad específica bulk fue de 2.455 y el contenido de asfalto de 5.1%, ésta coordenada se ve en la figura 61 como diseño, la cual se encuentra dentro del polígono de vacíos. Los resultados del diseño preliminar se muestran en la tabla 28.

En la figura 62 se puede ver el polígono de vacíos para la mezcla M-7. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 6.2% y una gravedad específica bulk de 2.518. Los promedios de los resultados de las probetas elaboradas con este contenido de asfalto dieron un flujo de 3.68 mm, el cual es superior al límite del requerimiento. Por lo cual, se disminuyó a 6.1% de asfalto y con la misma combinación de agregados se elaboraron nuevamente tres probetas. El resultado se muestra en la figura 62 como diseño y se encuentra dentro del polígono de vacíos. Con este contenido de asfalto cumple el flujo y demás requerimientos del diseño preliminar, los cuales se muestran en la tabla 28.

Las mezclas M-6 y M-7 tienen como agregado grueso la incorporación de escoria EAF y escoria BOF y como agregado fino la incorporación de BFD. Es decir, son las mezclas que involucran todos los agregados siderúrgicos. Observando la tabla 28 y comparando los resultados obtenidos con los de la mezcla base (M-1), se presenta la misma tendencia de las anteriores mezclas. El contenido de asfalto aumenta gradualmente con el aumento de la cantidad de residuos siderúrgicos en la mezcla. El valor del flujo está dentro del intervalo del requerimiento, siendo mayor el de la mezcla M-7. La estabilidad es superior al requerimiento establecido, pero en este caso la estabilidad de las mezclas M-6 y M-7 es levemente inferior a la estabilidad de la mezcla base.

Figura 62. Polígono de vacíos para la mezcla M-7



Fuente: El autor con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1.

Tabla 28. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-6 y M-7

Característica	Unidad	Valor			Requerimiento (Art. 450-13) INVIAS
		M-1	M-6	M-7	
Contenido de agregado (en peso)	%	95.2	94.9	93.9	-
Contenido de asfalto (en peso)	%	4.8	5.1	6.1	-
Gravedad específica bulk (G_{mb})	g/cm^3	2.376	2.455	2.514	-
Gravedad espec. máxima teórica (G_{mm})	g/cm^3	2.510	2.590	2.650	-
Estabilidad	N	11967	10311	10837	9000
Flujo, (mm)	mm	3.35	3.37	3.46	2.0 – 3.5
Relación: Estabilidad/flujo	kN/mm	3.57	3.06	3.13	3.0 - 6.0
Vacíos con aire (V_a)	%	5.15	5.09	4.97	4.0 – 6.0
Vacíos en agregados minerales (VAM)	%	15.80	16.28	16.05	>15.0
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	%	67.42	68.73	69.05	65 - 75
Asfalto absorbido (P_{ba})	%	0.24	0.47	1.70	-
Asfalto efectivo (P_{be})	%	4.57	4.65	4.50	-
Relación: Llenante/ligante efectivo	-	1.10	1.10	1.10	0.8 – 1.2

Fuente: El autor

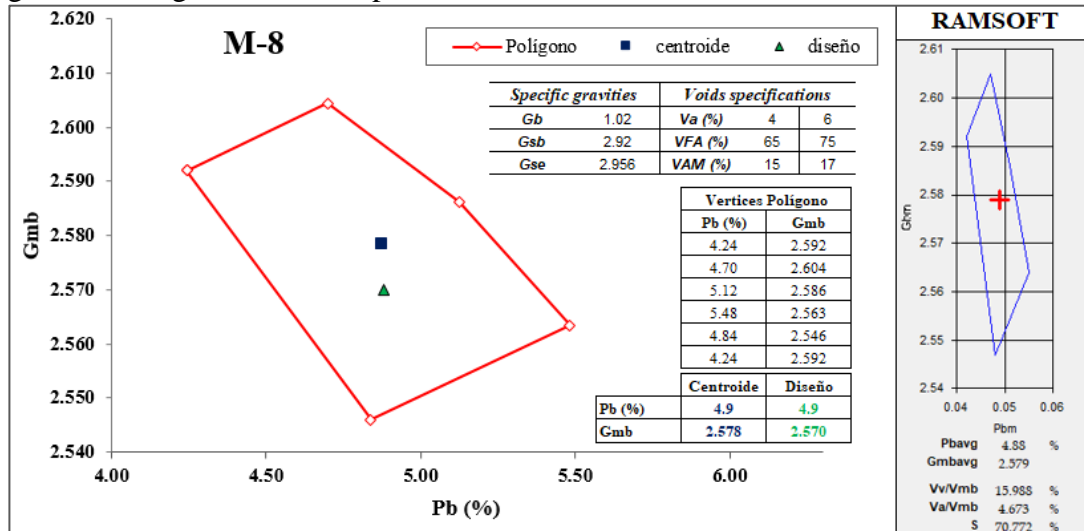
La figura 63 muestra el polígono de vacíos para la mezcla M-8, la cual muestra los datos de entrada, las coordenadas de los vértices, la coordenada del centroide que define el contenido óptimo teórico de ligante para la combinación de agregados establecida y el resultado de RAMSOFT. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 4.9 % y una gravedad específica bulk de 2.578.

Los promedios de los resultados de los ensayos realizados a las probetas elaboradas con este contenido de asfalto cumplieron todos los requerimientos del diseño preliminar. El valor del promedio de la gravedad específica bulk fue de 2.570 y el contenido de asfalto de 4.9 %, lo cual se observa en la figura 63 como diseño, dentro del polígono de vacíos. Los resultados del diseño preliminar se muestran en la tabla 29. La figura 64 presenta el polígono de vacíos para la mezcla M-9. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 4.5 % y una gravedad específica bulk de 2.810.

Los promedios de los resultados de los ensayos realizados a las probetas elaboradas con este contenido de asfalto cumplieron todos los requerimientos del diseño preliminar. El valor del promedio de la gravedad específica bulk fue de 2.796 y el contenido de asfalto de 4.5 %, lo cual se presenta en la figura 63 como diseño, dentro del polígono de vacíos. Los resultados del diseño preliminar se muestran en la tabla 29.

De la tabla 29, la cual compara los resultados de la mezcla base (M-1) con las mezclas diseñadas con escoria EAF como agregado grueso (M-8 y M-9), se puede observar que el contenido de asfalto es similar para las tres mezclas. Sin embargo, la mezcla M-9 presenta un contenido de asfalto menor que la mezcla base. La no presencia de BFD en estas mezclas hace que el contenido de asfalto no tenga una variación considerable. La estabilidad es superior al requerimiento y muy cercano al valor de estabilidad de la mezcla base, las propiedades volumétricas son similares en las tres mezclas, cumpliendo con los requerimientos.

Figura 63. Polígono de vacíos para la mezcla M-8



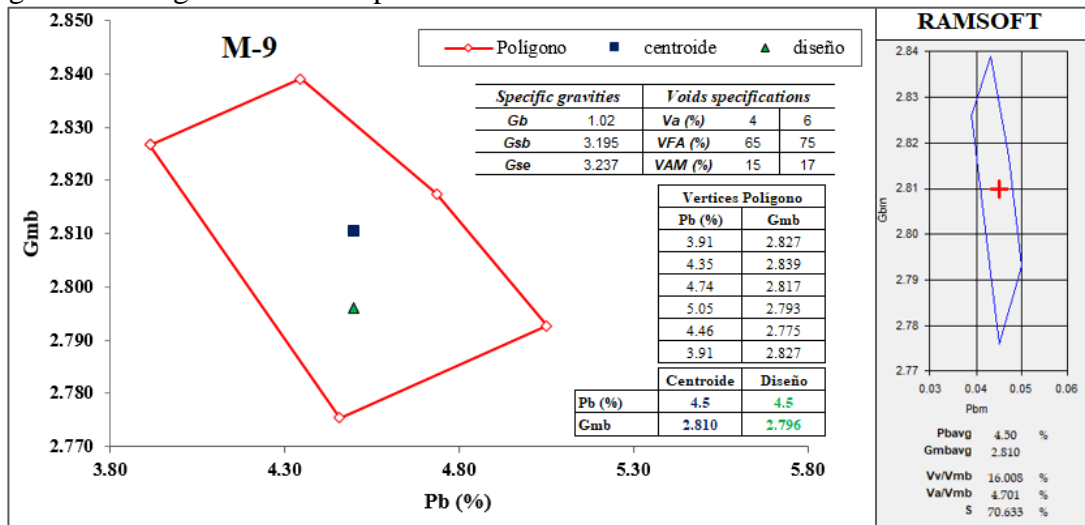
Fuente: El autor con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1

Tabla 29. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-8 y M-9

Característica	Unidad	Valor			Requerimiento (Art. 450-13) INVIAS
		M-1	M-8	M-9	
Contenido de agregado (en peso)	%	95.2	95.1	95.5	-
Contenido de asfalto (en peso)	%	4.8	4.9	4.5	-
Gravedad específica bulk (G_{mb})	g/cm^3	2.376	2.570	2.796	-
Gravedad espec. máxima teórica (G_{mm})	g/cm^3	2.510	2.700	2.950	-
Estabilidad	N	11967	11687	12300	9000
Flujo, (mm)	mm	3.35	2.51	2.47	2.0 – 3.5
Relación: Estabilidad/flujo	kN/mm	3.57	4.66	4.98	3.0 - 6.0
Vacíos con aire (Va)	%	5.15	4.97	5.15	4.0 – 6.0
Vacíos en agregados minerales (VAM)	%	15.80	16.31	16.41	>15.0
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	%	67.42	69.52	68.59	65 - 75
Asfalto absorbido (P_{ba})	%	0.24	0.42	0.41	-
Asfalto efectivo (P_{be})	%	4.57	4.50	4.11	-
Relación: Llenante/ligante efectivo	-	1.10	1.10	1.20	0.8 – 1.2

Fuente: El autor

Figura 64. Polígono de vacíos para la mezcla M-9

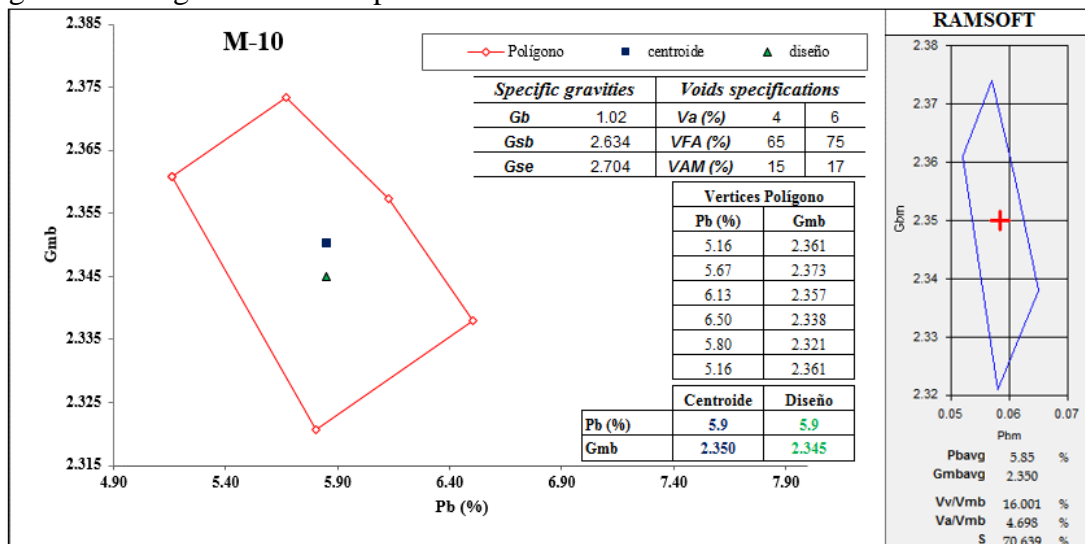


Fuente: El autor, con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1

La figura 65 presenta el polígono de vacíos para la mezcla M-10. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 5.9 % y una gravedad específica bulk de 2.350.

Los promedios de los resultados de los ensayos realizados a las probetas elaboradas con este contenido de asfalto cumplieron todos los requerimientos del diseño preliminar. El valor del promedio de la gravedad específica bulk fue de 2.345 y el contenido de asfalto de 5.9 %, ésta coordenada se ve en la figura 65 como diseño, la cual se encuentra dentro del polígono de vacíos. Los resultados del diseño preliminar se muestran en la tabla 30.

Figura 65. Polígono de vacíos para mezcla M-10



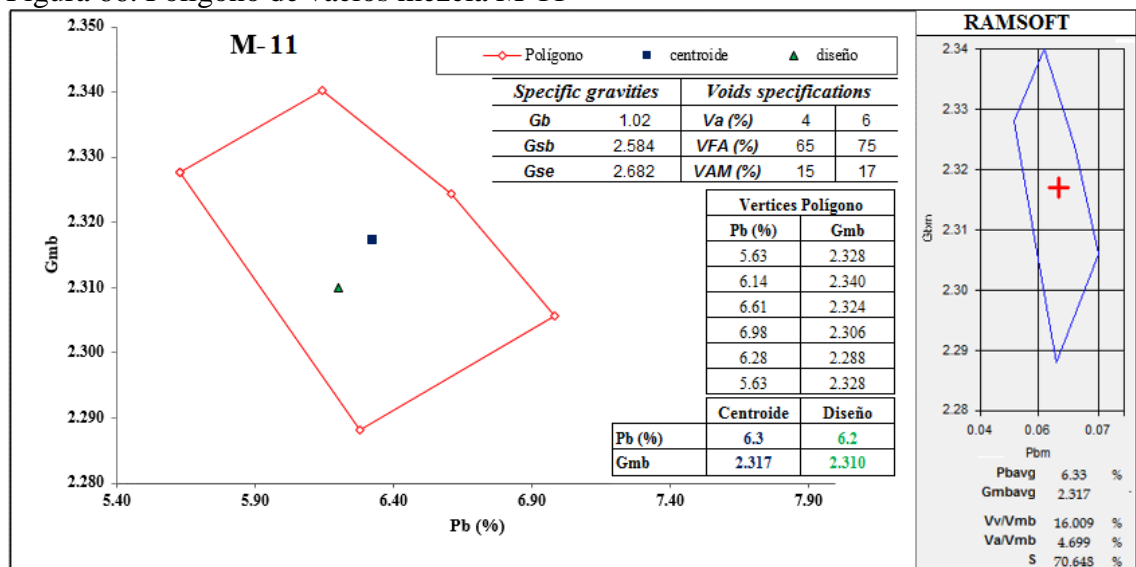
Fuente: El autor con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1

La figura 66 muestra el polígono de vacíos para la mezcla M-11, la cual muestra los datos

de entrada, las coordenadas de los vértices, la coordenada del centroide que define el contenido óptimo teórico de ligante para la combinación de agregados establecida y el resultado de RAMSOFT. El centroide define un porcentaje óptimo de asfalto de 6.3 % y una gravedad específica bulk de 2.317.

Los promedios de los resultados de las probetas elaboradas con este contenido de asfalto resultaron en un flujo de 3.54 mm, el cual es superior al límite del requerimiento. Por lo cual, se disminuyó a 6.2 % de asfalto y con la misma combinación de agregados se elaboraron nuevamente tres probetas. El resultado se muestra en la figura 66 como diseño y se encuentra dentro del polígono de vacíos. Con este contenido de asfalto cumple el flujo y demás requerimientos del diseño preliminar, los cuales se muestran en la tabla 30.

Figura 66. Polígono de vacíos mezcla M-11



Fuente: El autor con base en hoja de cálculo y RAMSOFTv1

Tabla 30. Resultados diseño preliminar de mezclas M-1, M-10 y M-11

Característica	Unidad	Valor			Requerimiento (Art. 450-13) INVIAS
		M-1	M-10	M-11	
Contenido de agregado (en peso)	%	95.2	95.1	95.5	-
Contenido de asfalto (en peso)	%	4.8	5.9	6.2	-
Gravedad específica bulk (G_{mb})	g/cm^3	2.376	2.345	2.310	-
Gravedad espec. máxima teórica (G_{mm})	g/cm^3	2.510	2.460	2.480	-
Estabilidad	N	11967	9925	9548	9000
Flujo, (mm)	mm	3.35	3.00	3.01	2.0 – 3.5
Relación: Estabilidad/flujo	kN/mm	3.57	3.32	3.17	3.0 – 6.0
Vacíos con aire (Va)	%	5.15	4.81	5.18	4.0 – 6.0
Vacíos en agregados minerales (VAM)	%	15.80	16.22	16.15	>15.0
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	%	67.42	70.32	67.94	65 – 75
Asfalto absorbido (P_{ba})	%	0.24	1.00	1.44	-
Asfalto efectivo (P_{be})	%	4.57	4.96	4.85	-
Relación: Llenante/ligante efectivo	-	1.10	1.00	1.00	0.8 – 1.2

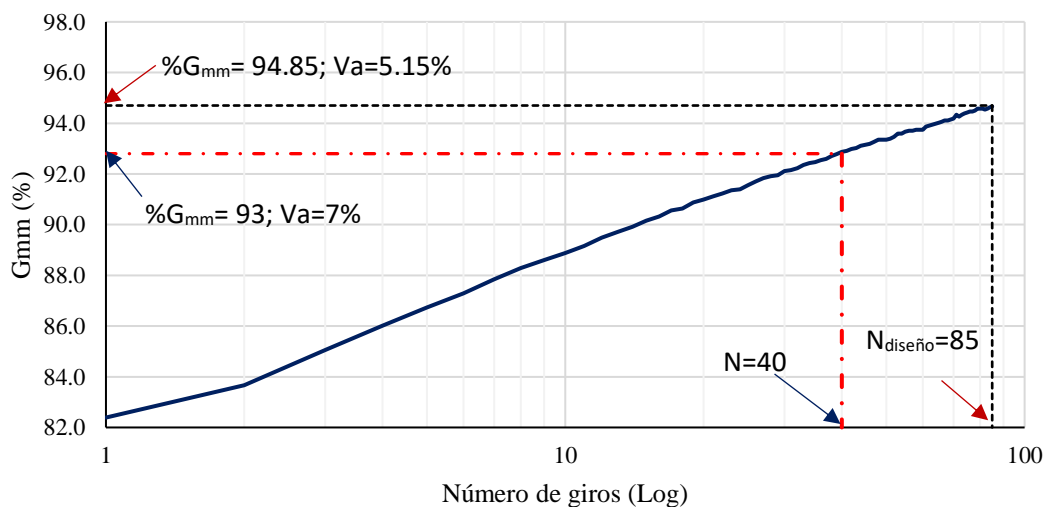
Fuente: El autor

De la tabla 30, la cual compara los resultados de la mezcla base (M-1) con las mezclas diseñadas con agregado grueso convencional y con la incorporación de BFD como agregado fino (M-10 y M-11), se puede observar que el contenido de cemento asfáltico aumento a medida que aumenta la proporción de BFD, lo que puede ser atribuido a la textura y porosidad del BFD y ratificado con el resultado de asfalto absorbido. La estabilidad es superior al mínimo exigido en los requerimientos, pero inferior a la estabilidad de la mezcla base, lo que puede atribuirse a la forma y textura de bordes redondeados del BFD y al mayor contenido de cemento asfáltico en las mezclas. Las propiedades volumétricas y demás características están dentro de los rangos de los requerimientos.

3.6.3 Verificación de las propiedades de desempeño. Después de encontrar la fórmula de trabajo, para cada una de las mezclas, se procedió con la realización de los ensayos para determinar las propiedades de desempeño.

3.6.3.1 Susceptibilidad a la humedad. Este es un aspecto importante, puesto que mide la resistencia al daño con presencia de agua en los concretos asfálticos. Se prepararon seis probetas de cada mezcla, tres para ser ensayadas en seco y tres para ser ensayadas después del proceso de acondicionamiento. Se mezcló cada combinación de agregados con el porcentaje óptimo de asfalto, se estabilizó la mezcla a la temperatura de compactación por un periodo de dos horas dentro de un horno. Después de este tiempo, se compactó cada una de las probetas en el compactador giratorio a 40 giros con el fin de alcanzar un volumen de vacíos con aire de 7 ± 1 %, figura 67. Consecutivamente, se dejaron enfriar las probetas después de compactadas, se determinaron las gravedades específicas máximas medidas y se midieron los espesores de cada probeta. Posteriormente, se determinó la gravedad específica bulk. Se dividieron los especímenes de cada mezcla en dos subgrupos, las probetas que se van a ensayar en seco se mantuvieron a temperatura ambiente y las otras se saturaron en la cámara de vacío hasta alcanzar un grado de saturación cercano al 70 %. Seguidamente, se acondicionaron las probetas sumergiéndolas en un baño de agua destilada a 60 ± 1.0 °C durante 24 horas.

Figura 67. Curva de compactación en función del %G_{mm} de la mezcla M-1



Fuente: El autor

Después de terminada la etapa de acondicionamiento, se ajusta la temperatura de las probetas a 25°C en baño de agua durante una hora, tanto las probetas acondicionada como las probetas que fueron ensayadas en seco. Por último, se determina la resistencia a la tracción indirecta de cada probeta, figura 68. El cálculo de la resistencia a la tracción se realizó con la ecuación 33 y la relación de resistencias a tracción del promedio de cada subgrupo con la ecuación 34. Los resultados se muestran en la tabla 31.

Figura 68. Ensayo de tracción indirecta.



Fuente: El autor

Tabla 31. Resultados ensayo de tracción indirecta

Condición	ID	h (mm)	P _{ult} (N)	R _T (kPa)	R _{T-PROM.} (kPa)	RRT (%)
<i>Mezcla M-1</i>						
Húmedo	M-1a	63.41	9340	919.3	901.0	88
	M-1b	63.23	9520	939.7		
	M-1c	63.75	8620	843.9		
	M-1d	63.73	10450	1023.4		
Seco	M-1e	63.31	9990	984.9	1022.9	
	M-1f	63.21	10740	1060.5		
<i>Mezcla M-2</i>						
Húmedo	M-2a	63.42	4850	477.3	467.6	81
	M-2b	63.51	4730	464.8		
	M-2c	63.68	4700	460.7		
	M-2d	65.07	6720	644.6		
Seco	M-2e	64.81	5750	553.7	575.8	
	M-2f	64.52	5470	529.1		
<i>Mezcla M-3</i>						
Húmedo	M-3a	64.10	3640	354.4	348.0	79
	M-3b	64.15	3520	342.5		
	M-3c	64.21	3570	347.0		
	M-3d	64.43	4610	446.6		
Seco	M-3e	64.65	4550	439.3	442.3	
	M-3f	63.12	4460	441.0		

Continuación Tabla 31

Condición	ID	h (mm)	P _{ult} (N)	R _T (kPa)	R _{T-PROM.} (kPa)	RRT (%)
<i>Mezcla M-4</i>						
Húmedo	M-4a	64.24	7830	760.7	740.1	84
	M-4b	64.68	7580	731.4		
	M-4c	63.85	7450	728.2		
Seco	M-4d	63.80	8450	826.6	879.3	
	M-4e	64.25	9320	905.4		
	M-4f	64.15	9310	905.8		
<i>Mezcla M-5</i>						
Húmedo	M-5a	65.85	5630	533.6	515.4	80
	M-5b	64.78	5520	531.8		
	M-5c	64.28	4950	480.6		
Seco	M-5d	64.69	6370	614.6	642.7	
	M-5e	63.25	6280	619.7		
	M-5f	64.15	7130	693.7		
<i>Mezcla M-6</i>						
Húmedo	M-6a	64.10	5870	571.6	569.6	79
	M-6b	64.21	5780	561.8		
	M-6c	63.89	5890	575.4		
Seco	M-6d	64.86	7750	745.8	722.4	
	M-6e	64.65	7150	690.3		
	M-6f	64.10	7510	731.2		
<i>Mezcla M-7</i>						
Húmedo	M-7a	64.35	5850	567.4	554.7	81
	M-7b	63.75	5460	534.6		
	M-7c	64.28	5790	562.2		
Seco	M-7d	64.50	7570	732.5	682.6	
	M-7e	64.72	6430	620.1		
	M-7f	63.91	7120	695.3		
<i>Mezcla M-8</i>						
Húmedo	M-8a	63.15	6468	639.3	620.3	85
	M-8b	62.94	6277	622.5		
	M-8c	64.84	6224	599.1		
Seco	M-8d	64.40	7419	719.0	725.7	
	M-8e	63.50	7357	723.1		
	M-8f	64.30	7572	735.0		
<i>Mezcla M-9</i>						
Húmedo	M-9a	63.80	6721	657.5	660.7	80
	M-9b	63.75	7026	687.9		
	M-9c	63.89	6518	636.7		
Seco	M-9d	63.10	8287	819.7	827.2	
	M-9e	62.70	8367	832.9		
	M-9f	63.30	8409	829.1		
<i>Mezcla M-10</i>						
Húmedo	M-10a	66.32	7021	660.7	653.2	84
	M-10b	67.45	7012	648.8		
	M-10c	67.46	7027	650.1		
Seco	M-10d	65.72	8506	807.8	773.7	
	M-10e	65.44	8405	801.6		
	M-10f	69.72	7950	711.7		
<i>Mezcla M-11</i>						
Húmedo	M-11a	69.18	4759	429.4	436.3	81
	M-11b	69.62	4852	435.0		
	M-11c	69.35	4939	444.5		
Seco	M-11d	69.89	5796	517.6	541.1	
	M-11e	68.74	6182	561.3		
	M-11f	68.48	5974	544.5		

h: altura de la probeta, **P_{ult}**: carga máxima, **R_T**: Resistencia a la tensión, **R_{T-PROM.}**: promedio de resistencia a la tensión, **RRT**: relación de resistencias a la tensión.

Fuente: El autor.

3.6.3.2 Resistencia a la deformación plástica. Esta propiedad hace referencia a la capacidad del concreto asfáltico para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito. Un pavimento es estable cuando conserva su forma y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento.

Uno de los equipos usados para este ensayo y en particular utilizado en este estudio es la rueda de pista de laboratorio (Wheel Tracking), Figura 69. El procedimiento seguido para la realización del ensayo fue el descrito en la norma INV E-756-13 (INVIAS, 2013).

Figura 69. Ensayo de resistencia a la deformación plástica permanente.



Fuente: El autor

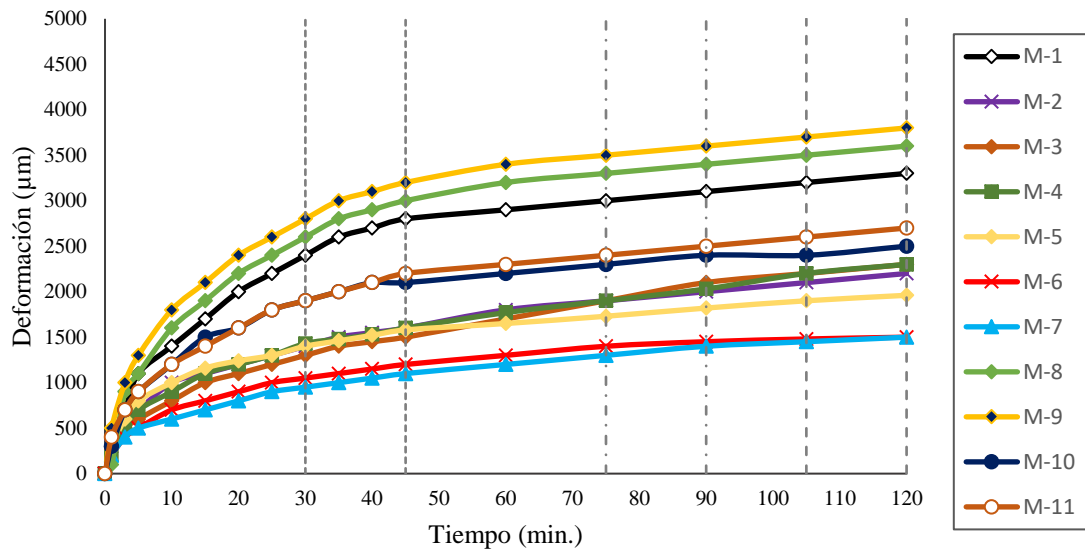
De acuerdo a la norma, la temperatura de ensayo fue de 60 ± 1.0 °C y la presión de contacto ejercida por la rueda fue de 900 ± 25 kN/m². Se registraron las deformaciones totales transcurridos 1, 3 y 5 minutos contados a partir del comienzo del ensayo. Posteriormente, se continuó con el registro de las deformaciones cada 5 minutos hasta completar 45 minutos y después cada 15 minutos hasta llegar a 120 minutos.

Con los resultados de las deformaciones registrados, se elaboró la curva de deformación y se calcularon las velocidades de deformación en los intervalos de 30 a 45 minutos, de 75 a 90 minutos y de 105 a 120 minutos. Con el objetivo de realizar la comparación de la deformación de la mezcla base con las demás mezclas, en la figura 70 se muestran las curvas de deformación.

Las velocidades de deformación calculadas de acuerdo a la norma INVIAS, se presentan en la tabla 32.

La norma INVIAS establece como parámetro para evaluar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas la velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos.

Figura 70. Curva de deformación de las mezclas



Fuente: El autor.

Tabla 32. Velocidades de deformación

ID Mezcla	Velocidad de deformación (µm/min.)		
	V 30/45	V 75/90	V 105/120
M-1	26.67	6.67	6.67
M-2	13.33	6.67	6.67
M-3	13.33	13.33	6.67
M-4	11.33	8.67	6.67
M-5	12.00	6.00	4.00
M-6	10.00	3.33	1.33
M-7	10.00	6.67	3.33
M-8	26.67	6.67	6.67
M-9	26.67	6.67	6.67
M-10	13.33	6.67	6.67
M-11	20.00	6.67	6.67

V30/45: velocidad en el intervalo de 30 a 45 minutos. **V75/90:** velocidad en el intervalo de 75 a 90 minutos. **V105/120:** velocidad en el intervalo de 105 a 120 minutos

Fuente: El autor.

3.6.3.3 Determinación del módulo resiliente. Para determinar el módulo resiliente de las mezclas asfálticas del estudio, se fabricaron tres probetas por cada tipo de mezcla, las cuales fueron ensayadas mediante el procedimiento de la norma prNE-12697-26-Anexo C (AENOR, 2012) en el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT), figura 71. Las probetas fueron elaboradas con la fórmula de trabajo y compactadas con el compactador giratorio para todos los casos.

Con esta prueba se determina el módulo resiliente de una probeta tipo Marshall, por medio del principio de tensión indirecta. El principio enuncia que, al aplicar una carga compresiva a través del diámetro de una muestra cilíndrica se produce una tensión sobre un diámetro ortogonal al cual se aplica la carga. Al registrar la carga vertical aplicada y la deformación horizontal producida se obtiene el módulo resiliente.

Figura 71. Equipo NAT para la determinación módulo resiliente



Fuente: El autor

Teniendo en cuenta que el ensayo es no destructivo, las probetas fueron ensayadas a 5 °C, 25 °C y 40 °C y a una frecuencia de 10 Hz. Se aplicaron 10 impulsos de acondicionamiento para permitir el ajuste del equipo, seguidamente se realizó la aplicación de los impulsos de carga a la probeta a lo largo del primer plano diametral, luego se rotó 90 ° y se repitió el procedimiento.

En la tabla 33 se presentan los resultados del ensayo de módulo resiliente, junto al promedio de las probetas para cada mezcla del estudio. Los valores del módulo resiliente obtenidos por cada probeta son valores cercanos entre si y no difieren en +10 % ó -20 % de acuerdo a la norma, el promedio de las tres probetas es el módulo resiliente para cada temperatura de ensayo. En el **Anexo B** se presentan los respectivos reportes.

El módulo resiliente depende de la temperatura del ensayo. Con base en los valores de los ensayos realizados y aplicando la técnica de regresión por mínimos cuadrados, se ajusta a una función matemática del tipo dado en la ecuación 50, esta ecuación representa el comportamiento del módulo resiliente para cada mezcla.

$$Mr = A * e^{B*T} \quad (50)$$

Donde, Mr =Módulo resiliente a la temperatura T ; T =Temperatura de la mezcla; A y B = Constantes de regresión.

Tabla 33. Resultados módulo resiliente.

ID mezcla	Temp. (°C)	Módulo resiliente (MPa)								
		5			25			40		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
M-1	Promedio	15611	14759	15307	2306	2520	2860	301	326	334
		15226			2562			320		
M-2	Promedio	9117	8417	7904	1820	1615	1831	475	416	446
		8479			1755			446		
M-3	Promedio	4442	4308	4838	827	999	894	301	257	224
		4529			907			261		
M-4	Promedio	7640	6295	6914	1350	1408	1497	335	424	334
		6950			1418			364		
M-5	Promedio	5815	6162	6293	1340	1438	1493	377	397	376
		6090			1424			383		
M-6	Promedio	7858	7278	8638	1877	1607	2057	487	402	560
		7925			1847			483		
M-7	Promedio	7720	8342	7857	1802	1901	1814	469	463	448
		7973			1839			460		
M-8	Promedio	8159	8357	9059	2411	2608	2457	624	622	673
		8525			2492			640		
M-9	Promedio	10425	9010	9494	2558	2877	2602	525	505	527
		9643			2679			519		
M-10	Promedio	8354	8113	9561	1766	1953	2141	416	454	520
		8676			1953			463		
M-11	Promedio	4960	4801	4942	1234	1209	1180	397	331	372
		4901			1207			366		

Fuente: El autor.

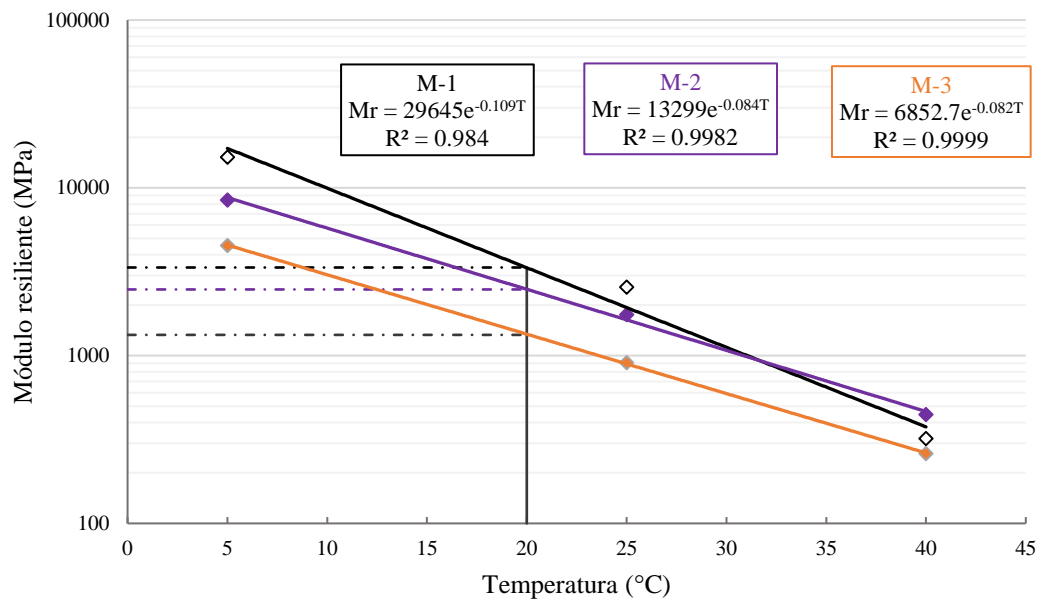
En la tabla 34 se presentan los resultados de los módulos resilientes obtenidos para una temperatura de la mezcla de 20°C. Las figuras 72, 73, 74, 75 y 76 presentan las líneas de tendencia del módulo resiliente para cada una de las muestras en estudio.

Tabla 34. Módulos resilientes a 20 °C

ID Mezcla	Módulo resiliente a 20 °C		
	MPa	Kg/cm ²	Lb/pulg ²
M-1	3351	34159	487985
M-2	2479	25270	361000
M-3	1329	13547	193528
M-4	2025	20642	294885
M-5	1927	19643	280614
M-6	2478	25260	360857
M-7	2480	25280	361142
M-8	3067	31264	446628
M-9	3155	32161	459442
M-10	2634	26860	383714
M-11	1652	16840	240571

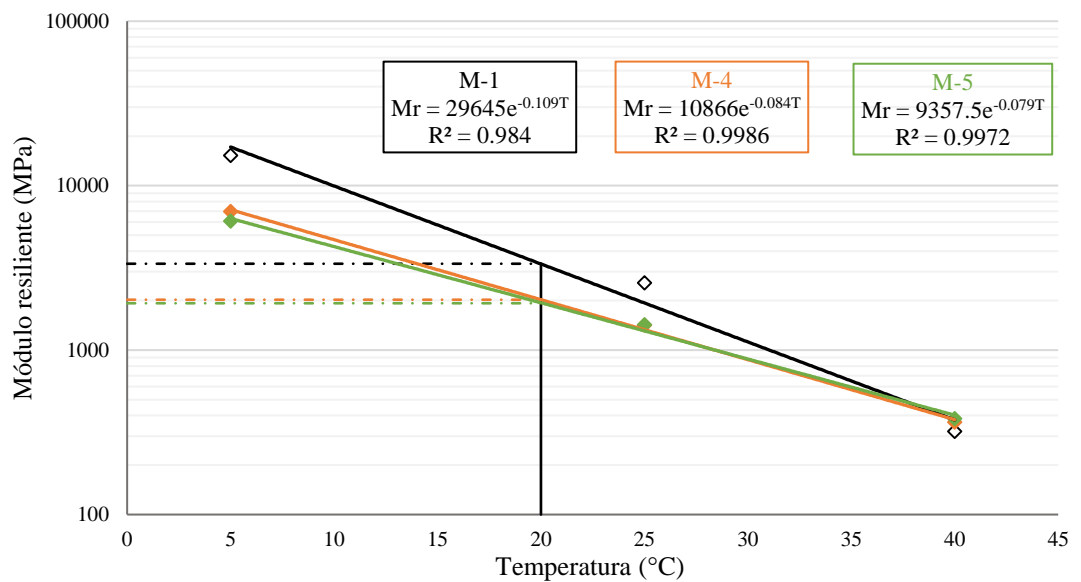
Fuente: El autor

Figura 72. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-2 y M-3



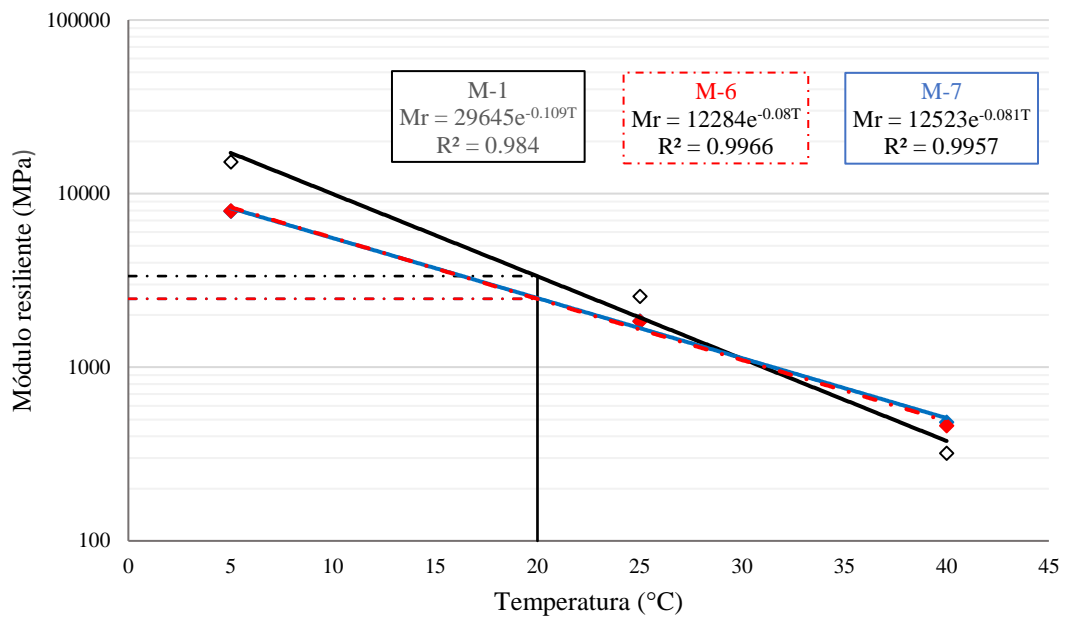
Fuente: El autor

Figura 73. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-4 y M-5



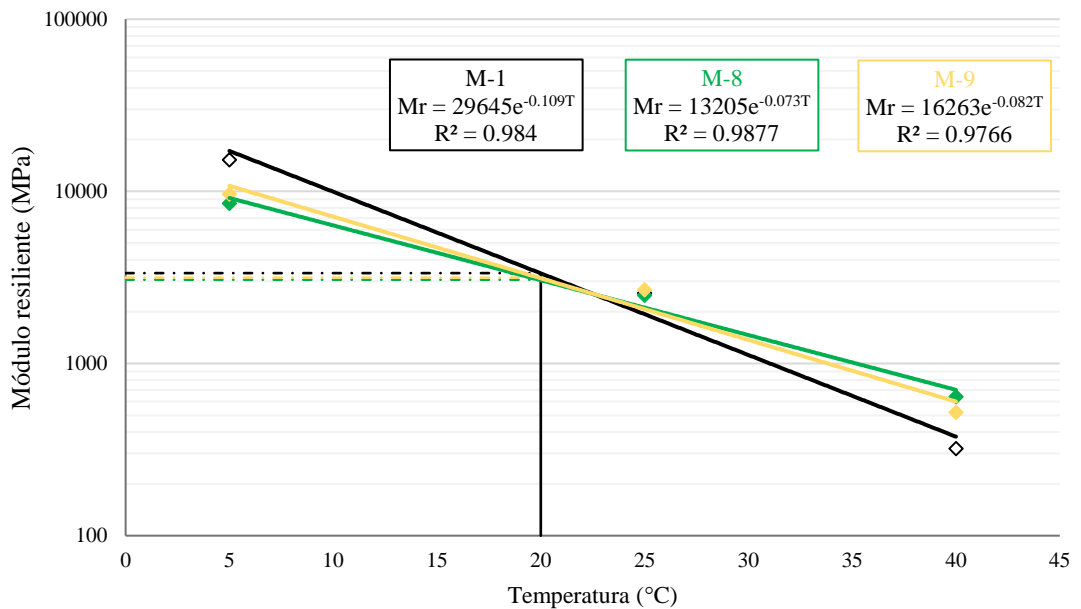
Fuente: El autor

Figura 74. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-6 y M-7



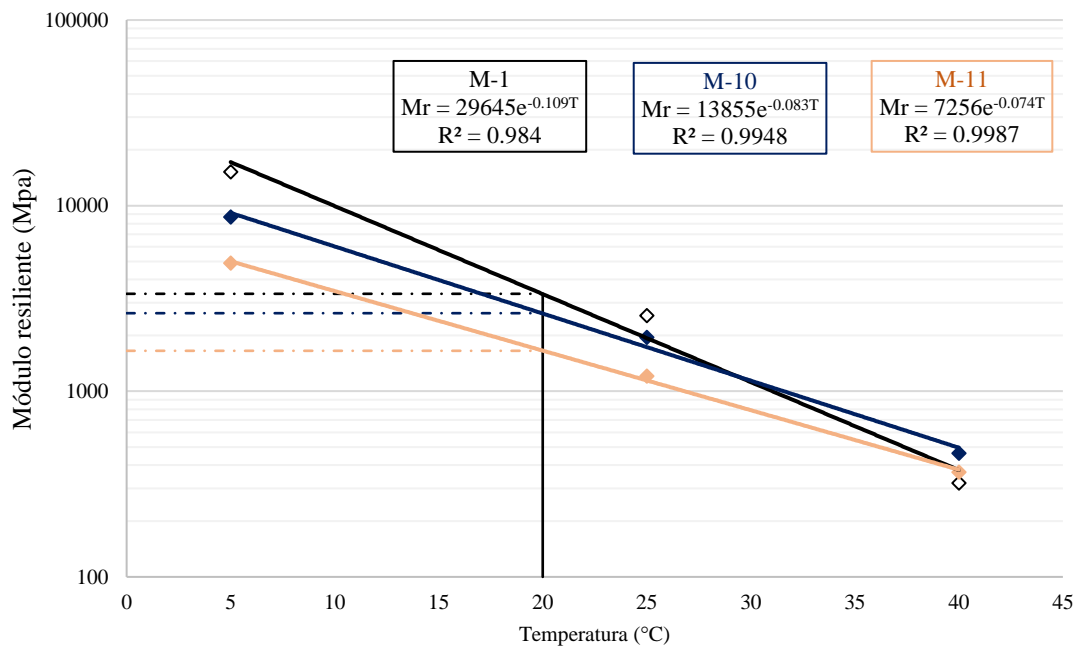
Fuente: El autor

Figura 75. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-8 y M-9



Fuente: El autor.

Figura 76. Líneas de tendencia del módulo resiliente mezclas M-1, M-10 y M-11



Fuente: El autor.

3.6.3.4 Resistencia a la Fatiga. Este ensayo tiene por objeto determinar el número de ciclos (de una determinada carga) necesarios para llegar a la falla de una briqueta. Se realizó bajo la norma *BS-EN 12697-24 Anexo E*, a una temperatura de 20 °C, una frecuencia de 2.5 Hz y bajo condiciones de esfuerzo controlado con el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester), figura 77.

Figura 77. Ensayo para determinar leyes de fatiga



Fuente: El autor

Se fabricaron ocho probetas para cada tipo de mezcla con el respectivo asfalto óptimo obtenido y su correspondiente composición granulométrica. Las briquetas elaboradas se dividen en cuatro grupos, cada grupo de dos probetas fueron sometidas al ensayo a distintas cargas; las cargas seleccionadas fueron en el rango de 250 kPa, a 350 kPa respectivamente. A cada biqueta sometida a este ensayo se le determinó la vida hasta la rotura a partir del número de aplicaciones de carga que causan la rotura. El esfuerzo en el centro de la biqueta se calculó con la ecuación 51 y la deformación máxima por tracción se calculó a partir de la ecuación 52.

$$\sigma_0 = \frac{2P}{\pi t \varphi} \quad (51)$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{2\Delta H}{\varphi} \right) \times \left[\frac{1+3\mu}{4+\pi^*\mu-\pi} \right] \quad (52)$$

Donde, σ_0 = Esfuerzo de tracción en el centro de la probeta (MPa); P = Carga máxima (N); t = Espesor de la probeta (mm); φ = Diámetro de la probeta (mm); ε_0 = Deformación por tracción en el centro de la probeta ($\mu\varepsilon$); ΔH = Deformación horizontal (mm); μ = Coeficiente de Poisson.

Para la obtener las leyes de fatiga para la predicción de la vida de fatiga, se utilizó la ecuación 53, de Wholer ([Pasandín & Pérez, 2017](#)).

$$\varepsilon_o = k(N_f)^{-n} \quad (53)$$

Donde, N_f = La cantidad de ciclos de carga hasta la falla por fatiga; k y n son constantes del material y ε_o = La deformación horizontal de tracción inicial en el centro de la muestra en $\mu\varepsilon$.

En la tabla 35 se presentan los resultados del ensayo de fatiga de las mezclas asfálticas en estudio. Con base en los valores de los ensayos para cada mezcla y aplicando la técnica de regresión por mínimos cuadrados se ajustaron a la función matemática de la ecuación 53. Esta ecuación representa el comportamiento de la deformación radial de cada mezcla (ley de fatiga). Los valores de deformación y número de ciclos a la falla presentados corresponden a los utilizados para calcular las ecuaciones para cada mezcla.

Tabla 35. Resultados ensayo de fatiga

ID Mezcla	Id Probeta	N° de ciclos	Deformación ($\mu\epsilon$)
M-1	FAT 250-1	14695	353
	FAT 250-2	14345	359
	FAT 300-1	1944	506
	FAT 300-2	3246	508
	FAT 320-1	3199	508
	FAT 320-2	6235	460
	FAT 350-1	2538	502
	FAT 350-2	2948	496
M-2	FAT 250-1	11032	284
	FAT 250-2	11500	294
	FAT 300	5589	357
	FAT 330-1	3544	426
	FAT 330-2	1052	473
	FAT 350-1	799	504
	FAT 350-2	3259	441
M-3	FAT 250-1	8560	378
	FAT 250-2	9260	389
	FAT 300	5266	445
	FAT 330-1	1592	494
	FAT 330-2	1768	489
	FAT 350-1	1042	496
	FAT 350-2	849	504
M-4	FAT 250-1	5649	378
	FAT 250-2	4917	389
	FAT 300	3845	428
	FAT 330-1	1268	494
	FAT 330-2	1389	489
	FAT 350-1	677	496
M-5	FAT 250-1	8956	374
	FAT 250-2	9856	382
	FAT 300-1	6548	424
	FAT 300-2	5436	422
	FAT 330	3824	464
	FAT 350-1	1124	500
M-6	FAT 250-1	8483	376
	FAT 250-2	1317	504
	FAT 300-1	6580	410
	FAT 300-2	5817	426
	FAT 330-1	3564	470
	FAT 330-2	2834	441
	FAT 350-1	986	527
M-7	FAT 250-1	1265	500
	FAT 250-2	9514	378
	FAT 300-1	8436	370
	FAT 300-2	3234	437
	FAT 350-1	3456	458
	FAT 350-2	1134	483
M-8	FAT 250-1	985	515
	FAT 250-2	8317	410
	FAT 300-1	7986	420
	FAT 300-2	5427	464
	FAT 330-1	6121	473
	FAT 330-2	3986	512
	FAT 350	2980	517
M-9	FAT 250-1	1276	588
	FAT 250-2	8984	382
	FAT 300-1	5765	462
	FAT 300-2	6074	441
	FAT 330-1	4017	483
	FAT 330-2	3765	496
	FAT 350-1	1245	592
	FAT 350-2	1114	601

Continuación Tabla 35

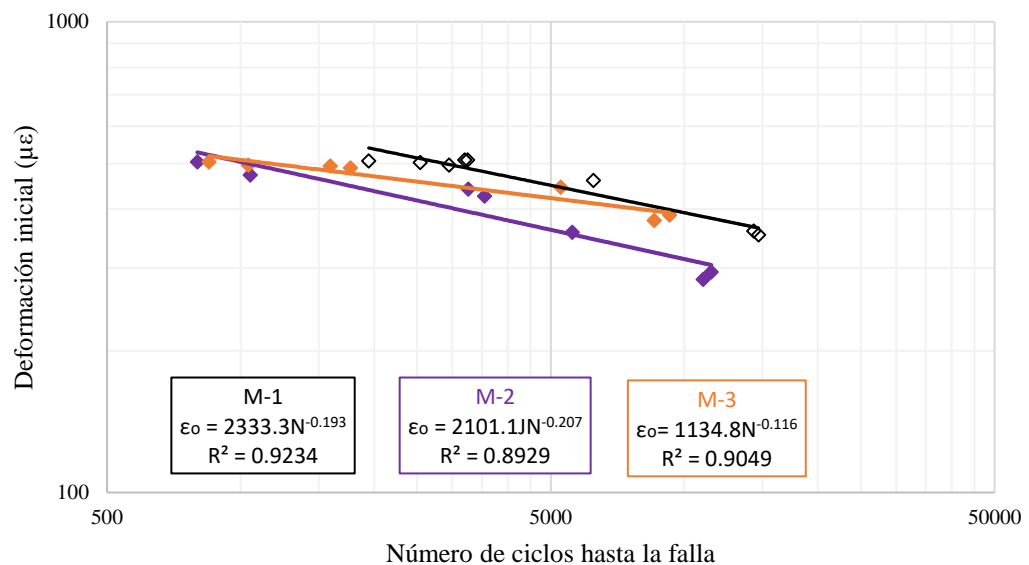
ID Mezcla	Id Probeta	N° de ciclos	Deformación ($\mu\epsilon$)
M-10	FAT 250-1	12857	439
	FAT 250-2	6767	427
	FAT 300-1	2890	466
	FAT 300-2	3916	463
	FAT 350-1	645	586
	FAT 350-2	774	545
M-11	FAT 250-1	5878	339
	FAT 300-1	4250	387
	FAT 300-2	3763	358
	FAT 330-1	2816	407
	FAT 330-2	2902	432
	FAT 350-1	1040	516

Fuente: El autor

La vida de fatiga se define como el número de ciclos de carga hasta donde ocurre la falla (N_f) y representa la capacidad de la mezcla para soportar las cargas cíclicas del tránsito (N. Li et al., 2013). Las figuras 78, 79, 80, 81 y 82 muestran la deformación de tracción frente al número de ciclos para las mezclas en estudio. Las figuras también incluyen las ecuaciones de la ley de fatiga y el coeficiente de correlación (R^2), lo que indica que existe correlación estadística entre los resultados obtenidos para determinar cada ley de fatiga, dado que los coeficientes R^2 son superiores a 0.89. En el **Anexo C** se presentan los respectivos reportes.

Como puede verse en la figura 78, las mezclas M-1 y M-2 presentan pendientes similares en sus leyes de fatiga, las cuales son más pronunciadas que la pendiente de la ley de fatiga de la mezcla M-3. Por esta razón, para deformaciones iniciales bajas, las mezclas M-1 y M-2 tienen una vida a fatiga más baja que la mezcla M-3. Para deformaciones iniciales altas, la mezcla M-1 y M-2 presenta una mayor vida a fatiga.

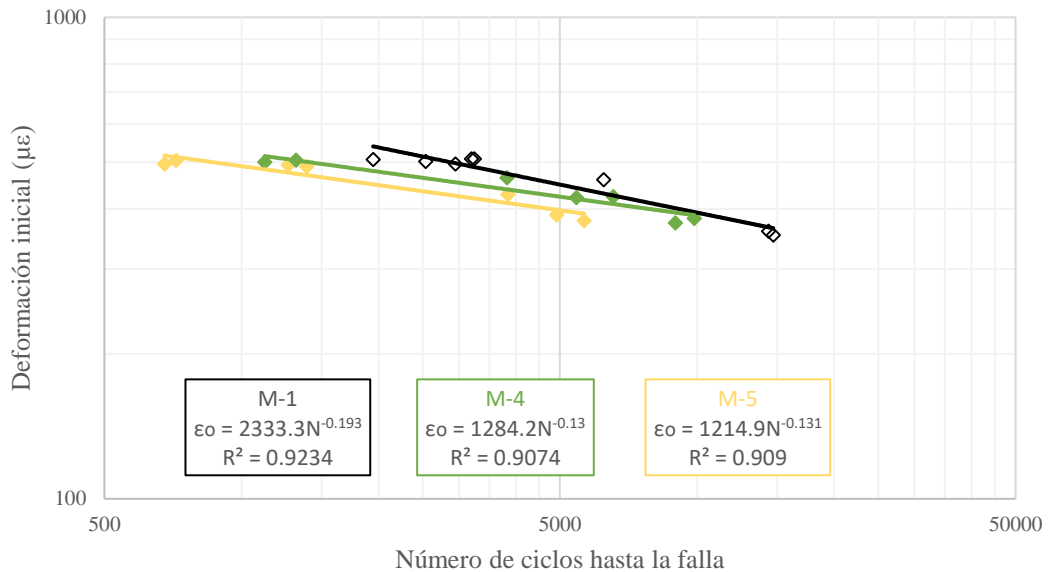
Figura 78. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-2 y M-3



Fuente: El autor

La comparación de las leyes de fatiga de las mezclas M-4 y M-5 respecto a la mezcla base (M-1) se muestra en la figura 76. Las mezclas M-4 y M-5 presentan pendientes similares en sus leyes de fatiga, las cuales son menos pronunciadas que la pendiente de la ley de fatiga de la mezcla M-1. Para deformaciones iniciales bajas, las mezclas M-4 y M-5 tienen una vida a fatiga más alta que la mezcla M-1. En consecuencia, Para deformaciones iniciales altas, la mezcla M-1 presenta mayor vida a fatiga que las mezclas M-4 y M-5.

Figura 79. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-4 y M-5

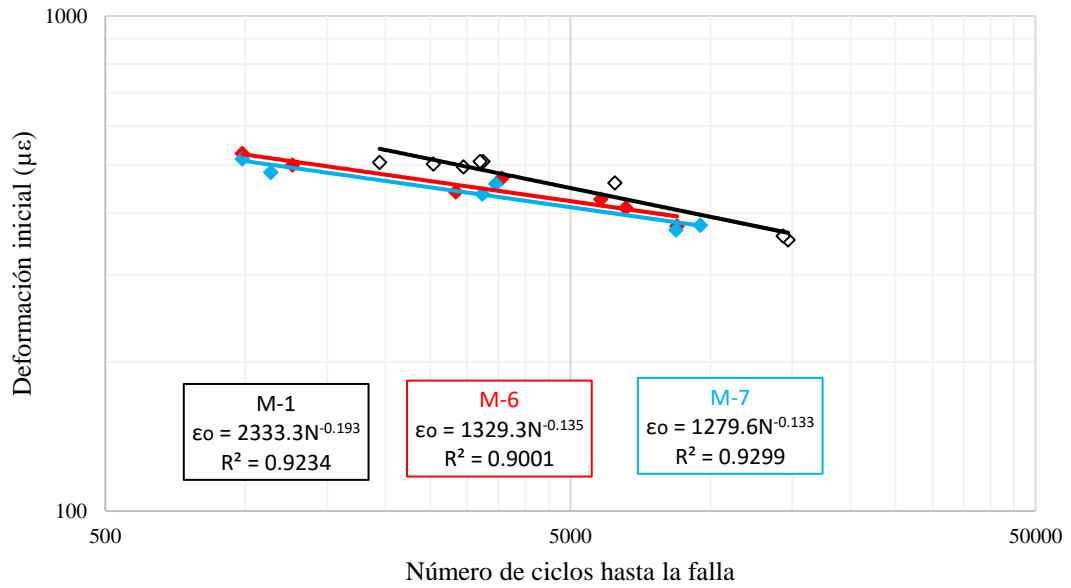


Fuente: El autor

En la figura 80 se muestra las leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-6 y M-7. Las leyes de fatiga de las mezclas M-6 y M-7 son muy similares. La pendiente de la ley de fatiga de la mezcla base (M-1) es mayor que las pendientes de las leyes de fatiga de las mezclas M-6 y M-7. Por lo anterior, para deformaciones iniciales altas, la mezcla M-1 presenta mayor vida a fatiga y a deformaciones iniciales bajas, tienen mayor vida a fatiga las mezclas M-6 y M-7.

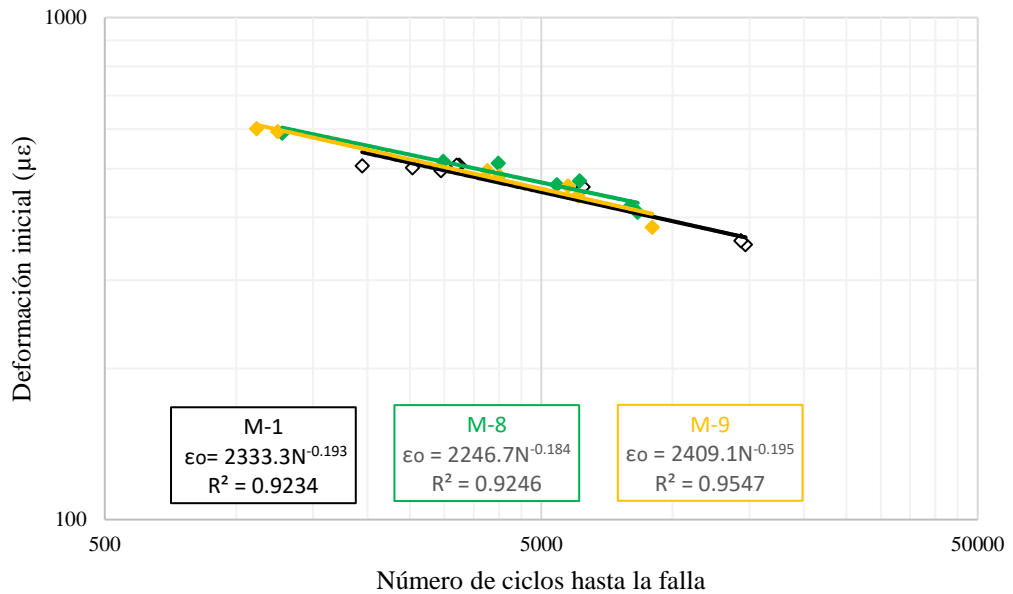
Como se observa en la figura 81, las leyes de fatiga de las mezclas M-8 y M-9 son similares entre si y también similares a la ley de fatiga de la mezcla base (M-1). Las pendientes de las tres leyes de fatiga son similares. En consecuencia, las mezclas M-8 y M-9 presentan una mejor vida a fatiga por estar por encima de la ley de fatiga de la mezcla M-1.

Figura 80. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-6 y M-7



Fuente: El autor

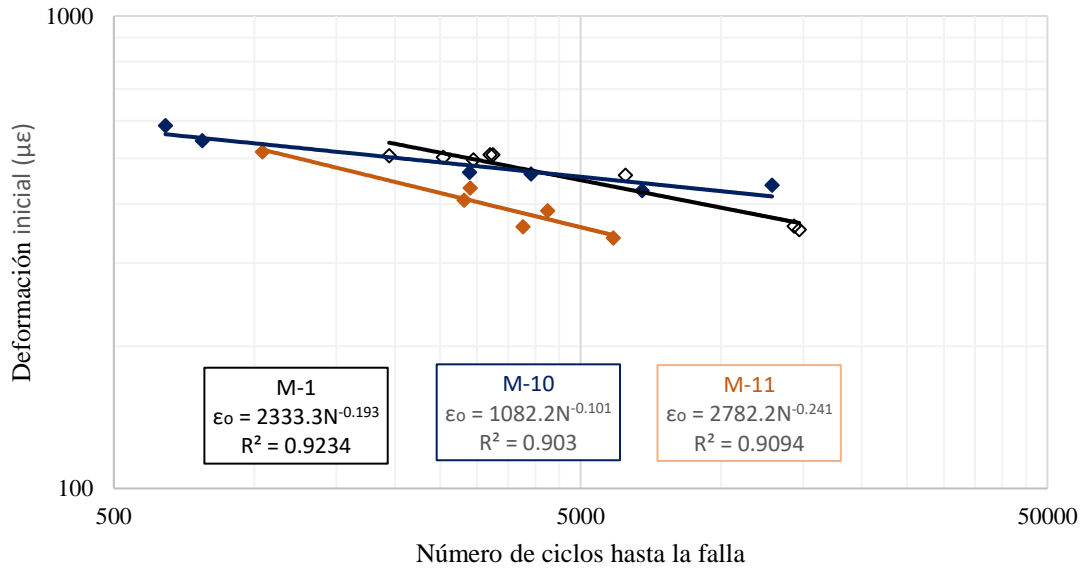
Figura 81. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-8 y M-9



Fuente: El autor

La figura 82 muestra las leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-10 y M-11. La ley de fatiga que presenta la mayor pendiente es la mezcla M-11 y la ley de fatiga de la mezcla M-10 presenta la menor pendiente. En consecuencia, a deformaciones iniciales bajas la mezcla M-10 presenta la mayor vida a fatiga y a deformaciones iniciales altas la mezcla M-11 presenta la mejor vida a fatiga.

Figura 82. Leyes de fatiga de las mezclas M-1, M-10 y M-11



Fuente: El autor

3.7 ESTUDIO REOLÓGICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON POLVO DE ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAFD.

El cemento asfáltico es el material aglutinante, encargado de unir el esqueleto de agregados dentro del concreto asfáltico (Amoussou et al., 2016). El cemento asfáltico está compuesto por asfáltenos y máltenos que le dan la característica viscoelástica, clasificándose en resinas, aromáticos y saturados (Loaiza et al., 2017). Un cemento asfáltico típico contiene un 2 % de saturados, 7 % de resinas, 18 % de asfáltenos y 73 % de compuestos aromáticos (Loaiza & Colorado, 2018). El concreto asfáltico es uno de los materiales más utilizados en la construcción de carreteras. Sin embargo, el cemento asfáltico presenta algunas características desfavorables, como su baja estabilidad térmica y alta degradación por radiación UV (Cong et al., 2012). Debido a que el cemento asfáltico es el material más costoso dentro del concreto asfáltico, las soluciones para mejorar sus limitaciones deben ser económicas y factibles para su uso en pavimentos.

Se han estudiado diferentes estrategias para mejorar el comportamiento del cemento asfáltico, entre ellas la adición de aditivos y modificadores, entre los más utilizados los de polímeros (Wang et al., 2017). Los rellenos minerales también se han utilizado como modificadores (Muniandy et al., 2013)(Siracusa et al., 2002), como las cenizas de cáscara de arroz, la andesita y polvo de vidrio, que en algunos casos han mejorado algunas propiedades del concreto asfáltico (Uzun & Terzi, 2012) (Sargin et al., 2013).

Por otra parte, la generación de residuos industriales ha creado la necesidad de generar alternativas para su utilización. El mejoramiento de cementos asfálticos o la fabricación de concretos asfálticos es una alternativa de solución para disminuir la acumulación de residuos industriales (Khedaywi, 2014). Es por lo anterior que en este estudio se analizó el comportamiento reológico del cemento asfáltico con la incorporación de polvo de escoria de horno de arco eléctrico EAFD, en tamaño menor a 0.037 mm (tamiz No 200).

3.7.1 Preparación del asfalto modificado con EAFD. En esta parte del estudio, se añadieron diferentes cantidades de EAFD (3 %, 6 % y 10 % en peso de asfalto) al cemento asfáltico original. Se utilizaron mezclas homogéneas entre el asfalto y el polvo de escoria, para lo cual el proceso de mezclado se llevó a cabo mediante un mezclador de alto cizallamiento.

Para incorporar el polvo de escoria al cemento asfáltico se realizó el siguiente procedimiento:

- Calentar el cemento asfáltico a una temperatura de 150 °C;
- Secar y calentar el polvo de escoria al horno a 150 °C durante cuatro horas
- Agregar el polvo de escoria al asfalto lentamente en el mezclador de alto cizallamiento
- Mezclar durante 20 minutos en el mezclador de alto cizallamiento a 4000 rpm, manteniendo la temperatura de 150 °C con ayuda de un mechero.

3.7.2 Pruebas de propiedades físicas. La consistencia del cemento asfáltico se midió con la prueba de penetración de acuerdo a la norma INV E-706-13/ASTM D5 (INVIAS, 2013g)(ASTM, 2006), esta prueba se realizó al cemento asfáltico original y a cada uno de los cementos asfálticos modificados con las diferentes proporciones de EAFD. El cemento asfáltico se calentó y se vertió en la copa de penetración, la muestra se colocó en baño maría durante una hora a 25 °C. El equipo de penetración se utilizó para realizar el ensayo con la carga total de 100 g, durante 5 segundos y a 25 °C.

El punto de ablandamiento se determinó de acuerdo a la norma INV E-712-13/ASTM D36 (INVIAS, 2013h)(ASTM, 2003), este ensayo es importante porque se determina la susceptibilidad a la temperatura del cemento asfáltico. El asfalto se calentó, seguidamente se vertió en dos anillos y se enfrió durante 30 minutos. Los dos anillos se colocaron en el soporte en un baño líquido, luego se colocaron las bolas de 3.5 g, una en cada muestra. Posteriormente, las muestras iniciaron a calentarse, registrando la temperatura a la que el asfalto tocaba la placa base. Esta prueba se realizó al asfalto original y a cada uno de los asfaltos modificados con los diferentes porcentajes de EAFD.

También, se determinó la pérdida de masa del cemento asfáltico después de envejecido en el horno rotatorio de película delgada RTFO. Para lo cual, se pesó el vaso de vidrio con el asfalto antes de colocarlo en el horno RTFO y se volvió a pesar después del tiempo de envejecimiento y por diferencia de los pesos se calculó el porcentaje de pérdida de masa.

Los resultados de los ensayos se muestran en la tabla 36, donde se evidencia un aumento en el punto de ablandamiento con el aumento de la cantidad de EAFD, mientras que disminuye el valor de penetración. El punto de ablandamiento del cemento asfáltico EAFD-10 aumentó en 3 °C y la penetración se redujo en 0.7 mm. En cuanto a la pérdida de masa con la incorporación de EAFD, se reduce la pérdida con respecto al cemento asfáltico base, obteniendo en todas las muestras valores menores a 1.0 % de acuerdo a los requerimientos de las normas mexicanas (SCT, 2005). El cemento asfáltico EAFD-10 registra una disminución de 0.08 %.

Tabla 36. Propiedades físicas y pérdida de masa del cemento asfáltico

ID C. asfáltico	% EAFD	Penetración 25°C, 0.1 mm	Punto de ablandamiento °C	Pérdida de masa después de RTFO, %
BASE	0	72	52	0.20
EAFD-3	3	70	52	0.16
EAFD-6	6	69	54	0.14
EAFD-10	10	65	55	0.12

Fuente: El autor

3.7.3 Pruebas de reómetro de corte dinámico DSR. El ensayo DSR fue propuesto por SHRP, el cual mide dos parámetros fundamentales: el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). G^* es la resistencia del cemento asfáltico a deformarse por esfuerzos de corte repetidos, se refiere a la tensión máxima de corte dividida por la carga máxima de corte. δ es el desfase entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte resultante durante el ensayo, se refiere al índice relativo de recuperación y deformación no recuperable (Shi et al., 2018). Entre mayor sea δ , el cemento asfáltico es más viscoso.

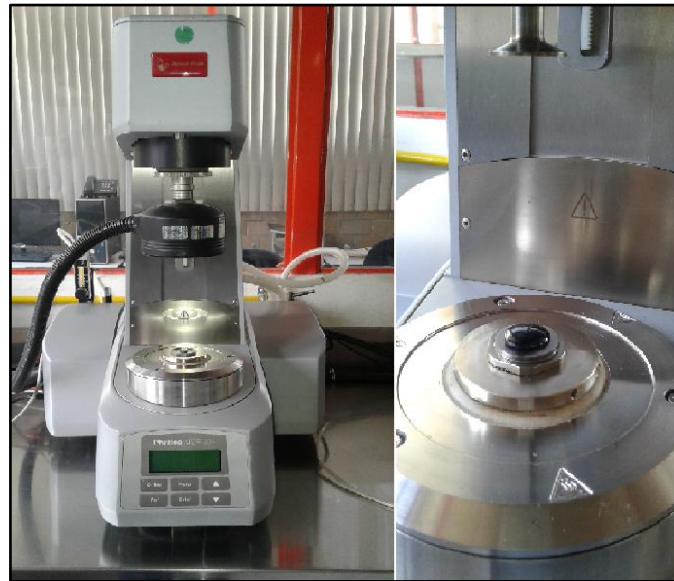
G^* y δ son utilizados para predecir el ahuellamiento y agrietamiento por fatiga. Con el fin de evitar el ahuellamiento de una mezcla asfáltica, el cemento asfáltico debe ser lo suficientemente rígido y elástico, por lo cual, la relación $G^*/\text{Sen}\delta$ debe ser alto. $G^*/\text{Sen}\delta$ debe ser como mínimo 1.0 kPa y 2.2 kPa para un cemento asfáltico original y envejecido en el horno rotatorio de película delgada (RTFO) respectivamente. Para evitar el agrietamiento por fatiga la mezcla debe ser elástica pero no tan rígida; por lo cual, la relación $G^* \text{Sen}\delta$ debe ser mínima cuando el cemento asfáltico ha sido envejecido a corto plazo en RTFO y a largo plazo en horno de envejecimiento a presión (PAV), como máximo se admite que $G^* \text{Sen}\delta$ sea igual a 5000 kPa (Rondón & Reyes, 2016).

El ensayo DSR se realizó a temperaturas que varían de 64 °C a 76 °C, y en la frecuencia de 10 rad/s en el equipo Anton Para MCR301, figura 83. El ensayo se llevó a cabo con muestras de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor para asfaltos sin envejecer y envejecidos a corto plazo en RTFO y muestras de 8 mm de diámetro y 2 mm de espesor para asfaltos envejecidos a corto plazo en RTFO y largo plazo en PAV. Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería en la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM.

Teniendo en cuenta las especificaciones de la prueba de SHRP, las propiedades reológicas del cemento asfáltico se midieron usando el DSR en tres tipos de muestras, las muestras de asfalto inicial, las muestras envejecidas a corto plazo y las muestras envejecidas a largo plazo.

El envejecimiento en horno rotatorio de película delgada RTFO se utilizó para simular el envejecimiento a corto plazo del cemento asfáltico. Durante la prueba, realizada de acuerdo a la norma ASTM D2872-12e1 (ASTM, 2004), se llenaron las botellas con 35 g de cemento asfáltico original y modificados. Seguidamente, se colocaron en el horno RTFO a 163 °C durante 80 minutos. Adicionalmente, se registró la pérdida de masa después de envejecido el cemento asfáltico.

Figura 83. Reómetro de corte dinámico DSR



Fuente: El autor

El residuo de las botellas se utilizó para elaborar las muestras para los ensayos DSR y MSCR, posteriormente se envejeció en el horno PAV. El envejecimiento en horno a presión PAV se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM D6521-13 (ASTM, 2008). Esta prueba simula el envejecimiento del cemento asfáltico a largo plazo durante la vida útil del pavimento. En cada bandeja se colocaron aproximadamente 50 g de cemento asfáltico previo envejecido en RTFO. Después del precalentamiento, se hizo funcionar el horno a una presión de 2.1 MPa, 100 °C y durante un tiempo de 20 horas. Pasado este tiempo, se liberó el aire atrapado durante 25 minutos. Con el residuo del asfalto se elaboraron las muestras para el ensayo DSR. Los resultados de los asfaltos iniciales se presentan en la tabla 37 y figura 84.

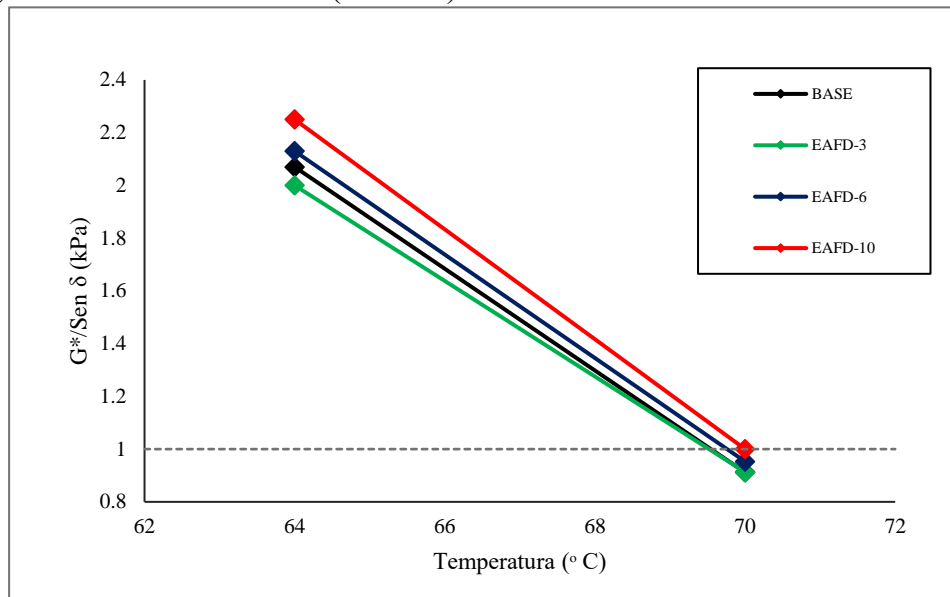
Tabla 37. Resultados de la prueba reológica de corte dinámico en asfaltos iniciales

Nivel de temperatura (°C)	Asfalto							
	Base		EAFD-3		EAFD-6		EAFD-10	
	G*(Pa)	δ (°)	G*(Pa)	δ (°)	G*(Pa)	δ (°)	G*(Pa)	δ (°)
64	2050	81.6	1980	81.9	2100	81.5	2230	81.5
70	907	83.9	909	84.1	948	83.8	999	83.8

Fuente: El autor

G* disminuye cuando aumenta la temperatura. Inicialmente, en el cemento asfáltico EAFD-3 disminuye el valor de G* con respecto al cemento asfáltico base, pero a medida que aumenta el contenido de EAFD el valor de G* es mayor que en el cemento asfáltico base. El valor del ángulo de fase δ aumenta con el incremento de temperatura, lo cual indica que el cemento asfáltico caliente pierde parte de la elasticidad y aumenta la porción del componente viscoso. El valor de δ permanece casi constante con el incremento en el porcentaje de EAFD.

Figura 84. Asfaltos iniciales ($G^*/\text{sen } \delta$)



Fuente: El autor

$G^*/\text{sen } \delta$ disminuye con el aumento de la temperatura, lo que indica que los pavimentos asfálticos son susceptibles al ahuellamiento a altas temperaturas. El valor de $G^*/\text{sen } \delta$ aumenta en el cemento asfáltico EAFD-10, mientras que los cementos asfálticos EAFD-3 y EAFD-6 tienden a disminuir o a permanecer casi iguales que el cemento asfáltico base. Los resultados de los cementos asfálticos envejecidos a corto plazo (RTFO) se muestran en la tabla 38 y figura 85.

Tabla 38. Resultados de la prueba reológica de corte dinámico en asfaltos RTFO

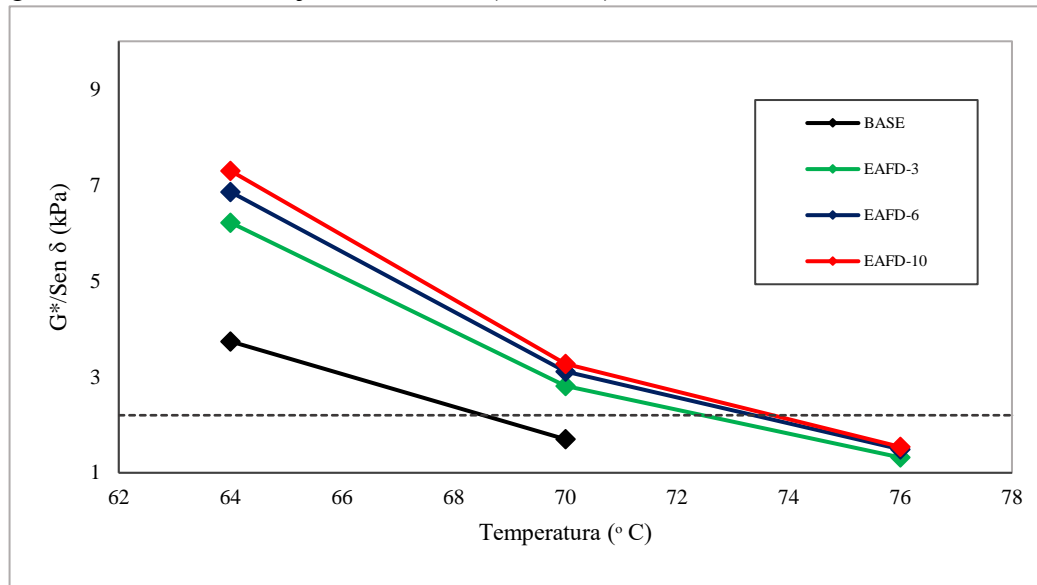
Nivel de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Asfalto							
	Base		EAFD-3		EAFD-6		EAFD-10	
	$G^*(\text{Pa})$	δ ($^{\circ}$)	$G^*(\text{Pa})$	δ ($^{\circ}$)	$G^*(\text{Pa})$	δ ($^{\circ}$)	$G^*(\text{Pa})$	δ ($^{\circ}$)
64	3650	77.4	5970	73.9	6570	73.4	7000	73.5
70	1670	80.3	2740	77.3	3030	76.9	3180	76.9
76			1300	80.3	1470	79.9	1510	80.0

Fuente: El autor

G^* disminuye y δ aumenta con el incremento de la temperatura. G^* aumenta y δ disminuye con la adición de EAFD, la disminución en δ indica que recupera componente elástico. A 70°C el cemento asfáltico EAFD-3 recupera en 3.7 % la elasticidad, mientras que los cementos asfálticos EAFD-6 y EAFD-10 recuperan un 4.2 % de elasticidad.

Los valores de $G^*/\text{sen } \delta$ aumentan cuando el cemento asfáltico se modifica con EAFD. El mayor incremento se presenta a 64°C , mientras que a 70°C el aumento es menor.

Figura 85. Asfaltos envejecidos RTFO ($G^*/\text{sen } \delta$)



Fuente: El autor

Los resultados de los cementos asfálticos envejecidos a largo plazo (RTFO+PAV) y ensayados a medianas temperaturas se muestran en la tabla 39 y figura 86.

En estos cementos asfálticos la tendencia es similar, G^* disminuye y δ aumenta con el incremento de la temperatura. Con la adición del EAFD, G^* aumenta y el valor de δ disminuye.

A 22 °C el aumento de G^* es de 26.3 % para el cemento asfáltico EAFD-10, mientras que la disminución en el valor de δ es de 2.3 % en el mismo asfalto, en relación con el cemento asfáltico base.

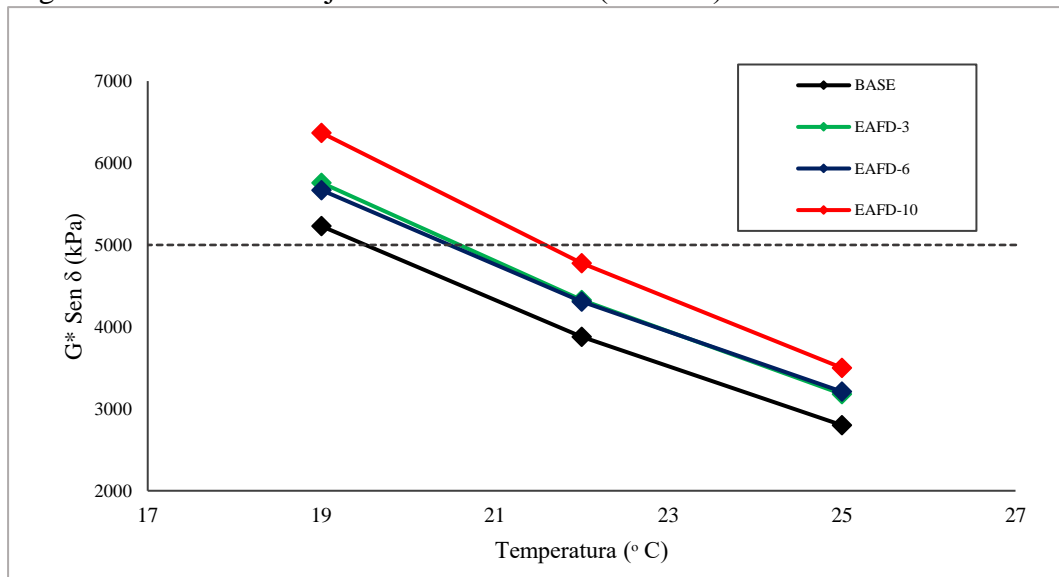
Tabla 39. Resultados de la prueba reológica de corte dinámico en asfaltos RTFO+PAV

Nivel de temperatura (°C)	Asfalto							
	Base		EAFD-3		EAFD-6		EAFD-10	
	$G^*(\text{kPa})$	δ (°)	$G^*(\text{kPa})$	δ (°)	$G^*(\text{kPa})$	δ (°)	$G^*(\text{kPa})$	δ (°)
19	9110	35.0	10200	34.4	10100	33.9	11400	34.0
22	6460	36.9	7340	36.2	7390	35.6	8160	35.9
25	4440	39.1	5140	38.1	5260	37.5	5700	37.9

Fuente: El autor

El valor de $G^* \text{ sen } \delta$ aumenta en los asfaltos modificados con EAFD. El aumento más evidente se presenta con la adición de 10% de EAFD. En general, se considera que los valores de $G^* \text{ sen } \delta$ más bajos tienen una mejor resistencia al agrietamiento por fatiga. Lo anterior indica que la adición de EAFD al cemento asfáltico tiene un ligero efecto negativo en la resistencia a la fatiga.

Figura 86. Asfaltos envejecidos RTFO+PAV (G^* $\text{Sen } \delta$)



Fuente: El autor

En consecuencia, el grado de desempeño a altas e intermedias temperaturas del cemento asfáltico base está en 64 °C ($G^*/ \text{Sen } \delta > 1.0 \text{ kPa}$ para asfaltos sin envejecer y $G^*/ \text{Sen } \delta > 2.2 \text{ kPa}$ para asfaltos RTFO) y 22 °C ($G^* \text{ Sen } \delta < 5000 \text{ kPa}$ para asfaltos envejecidos en RTFO+PAV).

3.7.4 Ensayo de recuperación elástica a diferentes esfuerzos MSCR. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma AASHTO TP70-07, el cual consiste en la medición de las propiedades viscoelásticas (mediante el “*creep compliance*”) del cemento asfáltico envejecido a corto plazo en RTOF, al aplicarle un esfuerzo de 0.1 kPa y 3.2 kPa. El ensayo mide la respuesta elástica en un cemento asfáltico sometido a un esfuerzo cortante y recuperación (Elizondo Arrita et al., 2013).

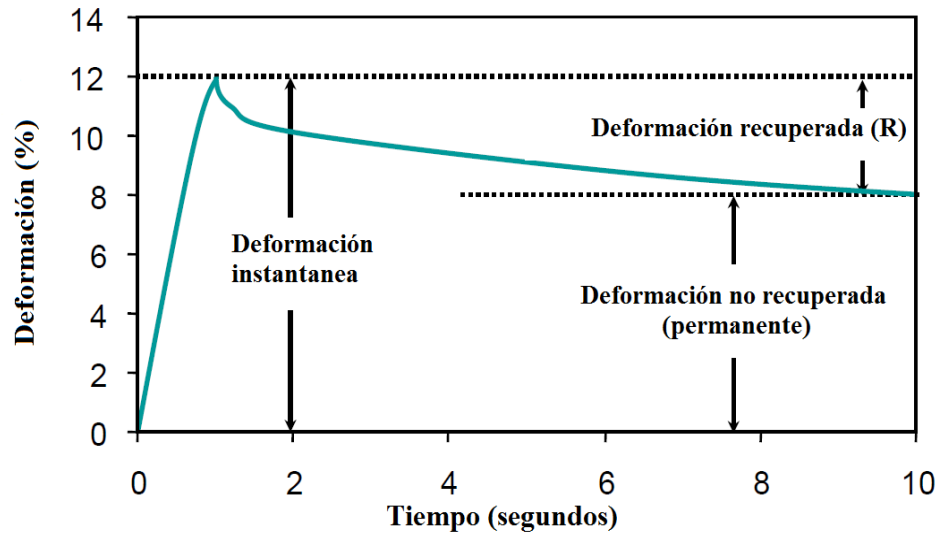
En este estudio, el ensayo MSCR se llevó a cabo a 64 °C con muestras de 25 mm de diámetro y 1 mm de espesor. La prueba aplicó 10 ciclos bajo esfuerzo de 0.1 kPa y 10 ciclos bajo esfuerzo de 3.2 kPa para un total de 20 ciclos. Cada ciclo incluye un segundo de carga y nueve segundos de recuperación. El porcentaje de recuperación (R) refleja que parte de la muestra volvió a su forma anterior después de haberla estirado repetidamente., la figura 87 muestra la representación de un ciclo del ensayo MSCR. El parámetro J_{nr} es una medida de la cantidad de deformación residual que queda en la muestra después de los ciclos de esfuerzo y recuperación, en relación con la cantidad de esfuerzo aplicado (Yao et al., 2018), la figura 88 muestra la representación del cálculo del parámetro J_{nr} .

La figura 89 muestra los resultados de la prueba bajo esfuerzo de 0.1 kPa y la figura 90 los resultados bajo esfuerzo de 3.2 kPa, donde se observa que a mayor esfuerzo se obtienen mayores deformaciones acumuladas.

Al mismo nivel de esfuerzo, la adición de EAFD disminuye la deformación acumulada.

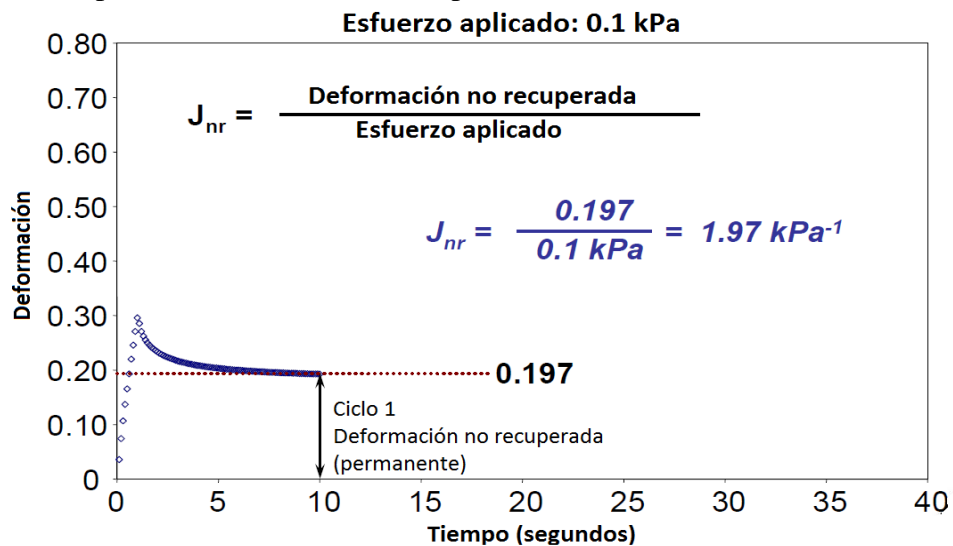
A medida que aumenta el contenido de EAFD, disminuye la deformación, siendo similar el comportamiento de los cementos asfálticos EAFD-6 y EAFD-10. Estos resultados verifican que la adición de EAFD mejora significativamente la resistencia del cemento asfáltico a la deformación permanente.

Figura 87. Representación gráfica de un ciclo en el ensayo MSCR



Fuente: R Michael Anderson, 2011

Figura 88. Representación del cálculo de parámetro J_{nr}

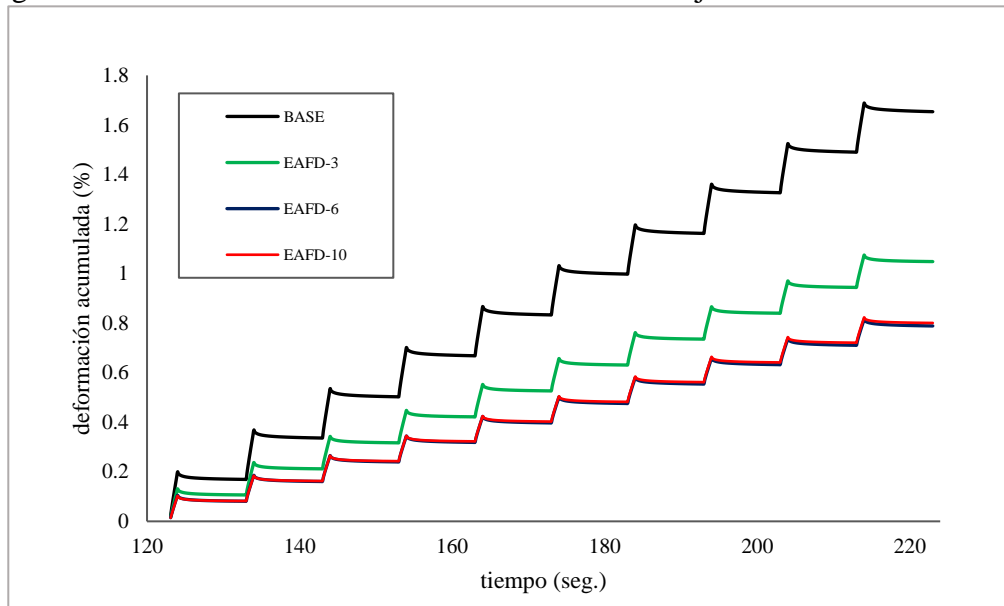


Fuente: R Michael Anderson, 2011

Los valores de R y J_{nr} se exponen en la tabla 40, la adición de EAFD aumenta el valor de R hasta el 6 % de EAFD, con la adición de 10 % de EAFD se presenta una leve disminución con respecto al valor de R del cemento asfáltico EAFD-6. El valor de J_{nr} se reduce con la adición de EAFD, lo que indica que la proporción de deformación no recuperada disminuye. Lo anterior demuestra que los cementos asfálticos modificados

con EAFD disminuyen su comportamiento elástico y aumenta su rigidez.

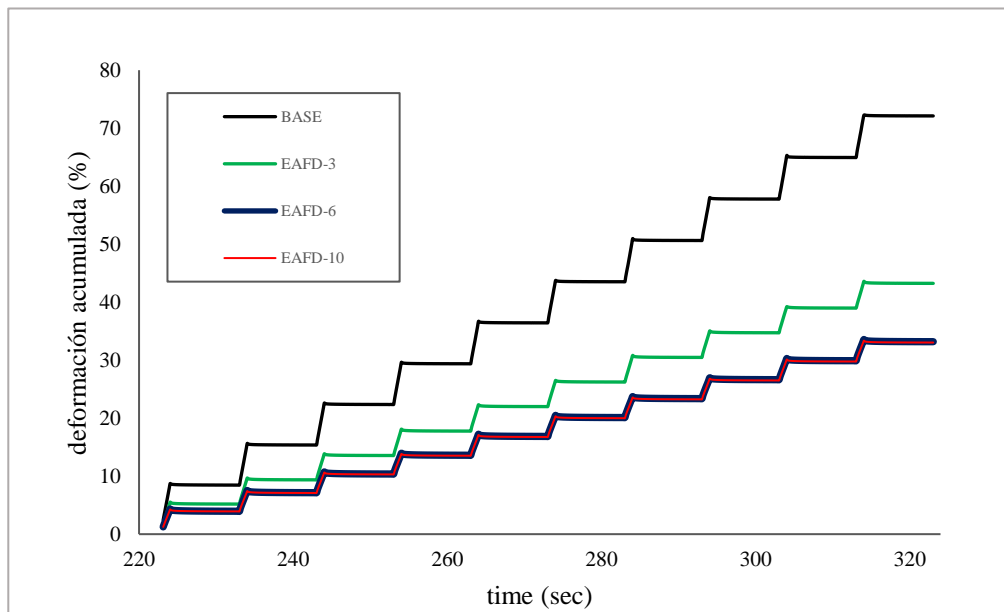
Figura 89. Resultados de deformaciones acumuladas bajo esfuerzo de 0.1 kPa.



Fuente: El autor

Las especificaciones de la AASHTO para el ensayo MSCR, tabla 41 (AASHTO, 2014), presenta los parámetros a cumplir del cemento asfáltico en cuanto a la deformación residual (J_{nr}) bajo esfuerzo de 3.2 kPa y la diferencia porcentual entre J_{nr} a 0.1 kPa y 3.2 kPa para diferentes niveles de tránsito.

Figura 90. Resultados de deformaciones acumuladas bajo esfuerzo de 3.2 kPa.



Fuente: El autor

Tabla 40. Valores de R y J_{nr} de los cementos asfálticos

Resultados		Asfaltos			
		BASE	EAFD-3	EAFD-6	EAFD-10
0.1 kPa	R (%)	16.92	19.91	24.74	21.71
	J_{nr} (1/kPa)	1.65	1.05	0.79	0.80
3.2 kPa	R (%)	3.56	7.02	10.10	9.19
	J_{nr} (1/kPa)	2.20	1.32	1.01	1.00
$J_{nr@3.2\text{ kPa}} - J_{nr@0.1\text{ kPa}}$		0.33	0.26	0.28	0.25
$J_{nr@0.1\text{ kPa}}$					

Fuente: El autor

Tabla 41. Especificaciones AASHTO para el ensayo MSCR

Condición	$J_{nr@3.2\text{ kPa}}$	$\frac{J_{nr@3.2\text{ kPa}} - J_{nr@0.1\text{ kPa}}}{J_{nr@0.1\text{ kPa}}}$
Tránsito estándar (<10 millones ESALs)	< 4	< 0.75
Tránsito alto (10 a 30 millones ESALs)	< 2	< 0.75
Tránsito muy alto (>30 millones ESALs)	< 1	< 0.75

Fuente: [AASHTO, 2014](#)

De acuerdo con las especificaciones de la AASHTO y a los resultados obtenidos, el asfalto base sin la adición de EAFD sería recomendado utilizar para tránsito estándar, mientras que con la incorporación de EAFD se puede utilizar para tránsito alto.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

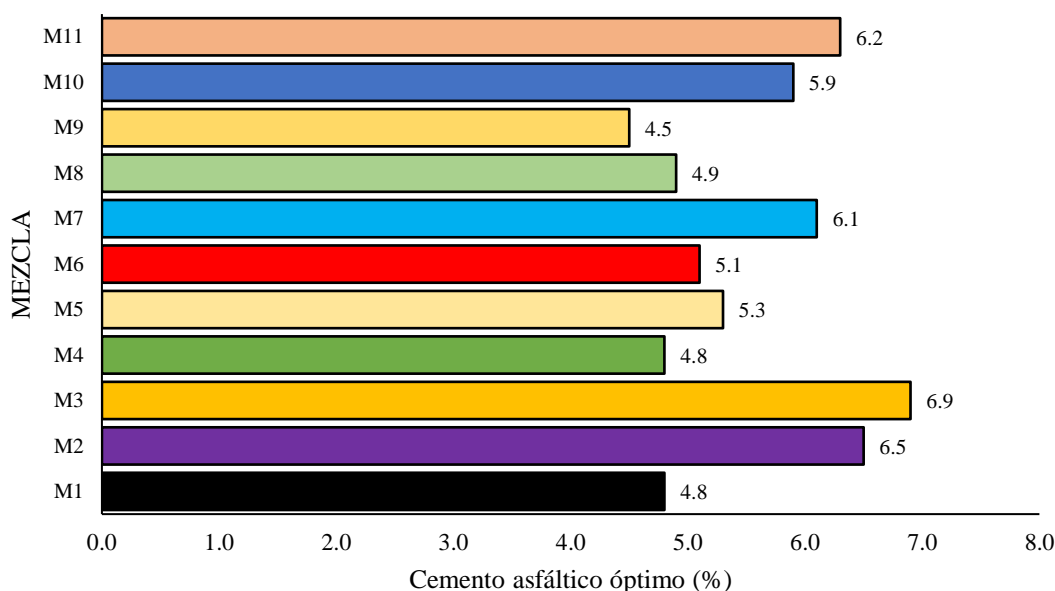
El capítulo 4 presenta y discute los resultados encontrados en el capítulo 3. La primera parte de este capítulo presenta el análisis y evaluación técnica de los resultados. La segunda parte presenta la evaluación económica, la cual se plantea de dos formas: primero el costo unitario por metro cúbico de la elaboración de cada una de las mezclas y posteriormente teniendo en cuenta las características de cada una de las mezclas se realiza el diseño de las estructuras de pavimento utilizando la metodología AASHTO, de acuerdo con los diseños, se establece la construcción de un kilómetro de vía y se evalúa el costo del concreto asfáltico necesario.

4.2 ANÁLISIS TÉCNICO.

Para realizar este análisis se presenta una comparación de las características y propiedades de cada una de las mezclas, en relación con el comportamiento mecánico y las pruebas de desempeño.

4.2.1 Contenido óptimo de cemento asfáltico. El contenido óptimo de cemento asfáltico en la mezcla base (M-1) fue de 4.8 %, las demás mezclas presentaron un incremento en el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, menos la mezcla M-9 que en su diseño el contenido óptimo fue de 4.5%. Lo anterior se puede observar en la figura 91.

Figura 91. Comparación del contenido óptimo de cemento asfáltico



Fuente: El autor

La mezcla M-2 y M-3 elaboradas con escoria BOF y BFD, presentaron un incremento de 1.7% y 2.1% respectivamente en el contenido de asfalto, respecto al contenido de asfalto de la mezcla base (M-1), siendo el contenido de asfalto de la mezcla M-3 el más alto de todas las mezclas analizadas. Este incremento se puede atribuir a las características de porosidad que presenta el BFD y en menor proporción la escoria BOF, lo cual puede ser ratificado por el porcentaje de absorción encontrado para estos materiales, 5.65% y 2.55% respectivamente, los cuales son superiores a la absorción de los materiales convencionales (grava y arena). Por consiguiente, a mayor cantidad de escoria BOF y BFD mayor será el contenido de asfalto, por lo cual la mezcla fabricada con 100% de escoria BOF y BFD (M-3) presentó el mayor contenido de asfalto.

En la mezcla M-4 elaborada con 50% de EAF y 50% de BFD el contenido de cemento asfáltico fue el mismo que el de la mezcla base (4.8%), esto se puede relacionar con la textura de la escoria EAF la cual no presenta porosidad y el porcentaje de absorción es menor que la absorción de la grava utilizada como agregado grueso. La mezcla M-5 presentó un incremento de 0.5% en el contenido de asfalto respecto de la mezcla base y de la mezcla M-4, esta mezcla fue elaborada con 100% de escoria EAF y 100% de BFD. Este incremento puede ser atribuido a las características del BFD.

La mezcla M-6 presentó un incremento en el contenido de asfalto de 0.3% con respecto del contenido de asfalto de la mezcla base, de igual forma la mezcla M-7 presentó un incremento de 1.3%. Estas mezclas fueron elaboradas utilizando simultáneamente las escorias BOF y EAF como agregado grueso y BFD como agregado fino. Estos incrementos en los porcentajes de cemento asfáltico ratifican en cierta medida lo expresado en las mezclas analizadas anteriormente.

En las mezclas M-8 y M-9 no se utilizó BFD como agregado fino, razón por la cual el incremento en el contenido de cemento asfáltico en la mezcla M-8 solo fue de 0.1%, mientras que en la mezcla M-9 se presentó una disminución de 0.3%. Esta disminución puede obedecer a que la escoria EAF presenta menor absorción que la grava utilizada.

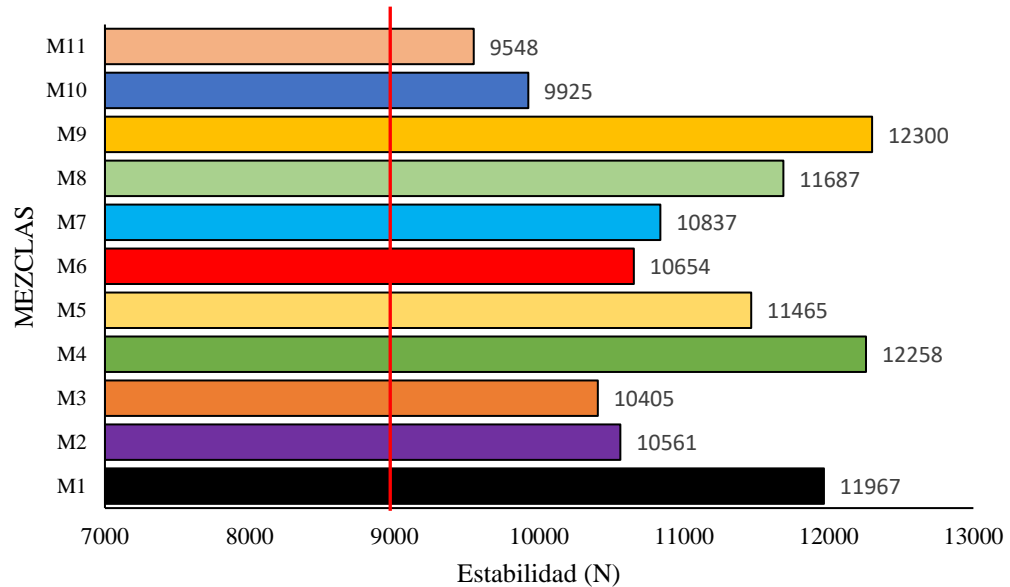
En las mezclas M-10 y M-11, se utilizó únicamente BFD en el reemplazo parcial y total del agregado fino y como agregado grueso se utilizó únicamente grava. Teniendo en cuenta lo anterior, la mezcla M-10 presentó un incremento de 1.1% respecto del contenido de asfalto de la mezcla base; de igual forma la mezcla M-11 presentó un incremento de 1.4%. Como se ha mencionado anteriormente, el incremento en la cantidad de cemento asfáltico puede ser atribuido a las características de porosidad que tiene el BFD y a la mayor absorción de este con respecto a la absorción de la arena.

4.2.2 Estabilidad Marshall. La estabilidad de las mezclas depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna o entre partículas está relacionada con la forma y textura superficial de los agregados. La cohesión está relacionada con la capacidad ligante del cemento asfáltico.

Teniendo en cuenta los criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, para la categoría de tránsito NT3, la estabilidad mínima requerida es de 9000 N. la

figura 92 muestra los resultados de las estabildades de las mezclas.

Figura 92. Comparación de los resultados de estabilidad.



Fuente: El autor

Todas las mezclas elaboradas cumplen con este requerimiento. La estabilidad de la mezcla base (M-1) es de 11967 N. La estabilidad más alta registrada fue la de la mezcla M-9 con un valor de 12300 N, lo que quiere decir un 2.8% superior que la de la muestra base M-1. La menor estabilidad registrada se presenta en la mezcla M-11 con un valor de 9548 N, es decir 20.2% menos que la estabilidad de la mezcla base. Las mezclas con valor de estabilidad superior a la de la mezcla base fueron M-4 y M-9 con un incremento de 2.4 % y 2.8 % respectivamente.

La mezcla M-2 reportó una estabilidad de 10561 N, lo que indica una disminución del 11.7% respecto de la mezcla base. De igual forma, la mezcla M-3 reportó una estabilidad de 10405 N, para una disminución de 13.1%. Esta disminución puede obedecer al aumento en el contenido de cemento asfáltico atribuido a las características de la escoria BOF y del BFD y a la textura superficial de la escoria BOF. Además, debido a la alcalinidad de la escoria BOF, más alta que la de la grava. Esto obedece a un vínculo más fuerte con el cemento asfáltico, por lo cual, aunque esta mezcla tenga un mayor contenido de cemento asfáltico la estabilidad reportada es superior en 17.3% a la mínima exigida en los requerimientos. En la mezcla M-3, a pesar de tener el mayor contenido de cemento asfáltico, la estabilidad encontrada es superior en un 15.6% con respecto al mínimo requerido, lo que puede ser atribuido a lo expuesto con la mezcla M-2. Los valores de estabilidad encontrados en este trabajo están en concordancia con otros investigadores que utilizaron únicamente escoria BOF como agregado grueso, como el caso de [Huang et al., \(2012\)](#) que reemplazo 20% de agregado grueso por escoria BOF y encontró una estabilidad de 14500 N. Así mismo, [Kong et al., \(2019\)](#) encontró estabildades superiores a 14000 N en las mezclas elaboradas con escoria BOF.

En la mezcla M-4 se encontró una estabilidad levemente superior (2.4%) y en la mezcla M-5 la estabilidad fue levemente inferior (4.2%) respecto de la estabilidad de la mezcla base y superiores en 36.2% y 27.4% respectivamente en relación con el mínimo requerido. Estas mezclas fueron elaboradas con escoria EAF y BFD, por lo cual se puede atribuir este resultado al menor contenido de cemento asfáltico, en relación con las mezclas elaboradas con escoria BOF, y a la textura superficial y dureza de la escoria EAF. En la investigación de [Masoudi et al., \(2017\)](#) utilizaron escoria EAF como agregado grueso y encontraron estabilidades superiores a 16000 N.

La mezcla M-6 elaborada con los dos tipos de escoria y grava natural como agregado grueso y BFD y arena como agregado fino, presentó una estabilidad menor en 11.0% en relación a la estabilidad de la mezcla base y superior en 18.4 % en relación con el mínimo requerido en las especificaciones. La mezcla M-7 elaborada únicamente con los dos tipos de escoria como agregado grueso y BFD como agregado fino, presentó una estabilidad menor en 9.4% y superior en 20.4% respecto de la estabilidad de la mezcla base y la estabilidad mínima requerida en las especificaciones respectivamente. La disminución respecto de la mezcla base puede ser atribuida al aumento en el contenido de cemento asfáltico debido a las características de porosidad de la escoria EAF, la escoria BOF y el BFD; y contrarrestada en cierta medida por la textura superficial y dureza de las escorias.

Las mezclas M-8 y M-9 fueron elaboradas sustituyendo parcial y totalmente el agregado grueso por escoria EAF respectivamente. La mezcla M-8 presentó una estabilidad levemente inferior (2.3%) a la de la mezcla base y superior en 29.9% respecto al mínimo requerido. La mezcla M-9 presentó una estabilidad levemente superior (2.8%) a la estabilidad de la mezcla base y superior en 36.7% con respecto a los 9000 N exigidos en las especificaciones. El comportamiento de la estabilidad en estas mezclas puede ser atribuido a la no presencia de BFD como agregado fino y a la textura superficial y dureza de la escoria EAF, lo cual hace que los contenidos de cemento asfáltico sean similares a los de la mezcla base.

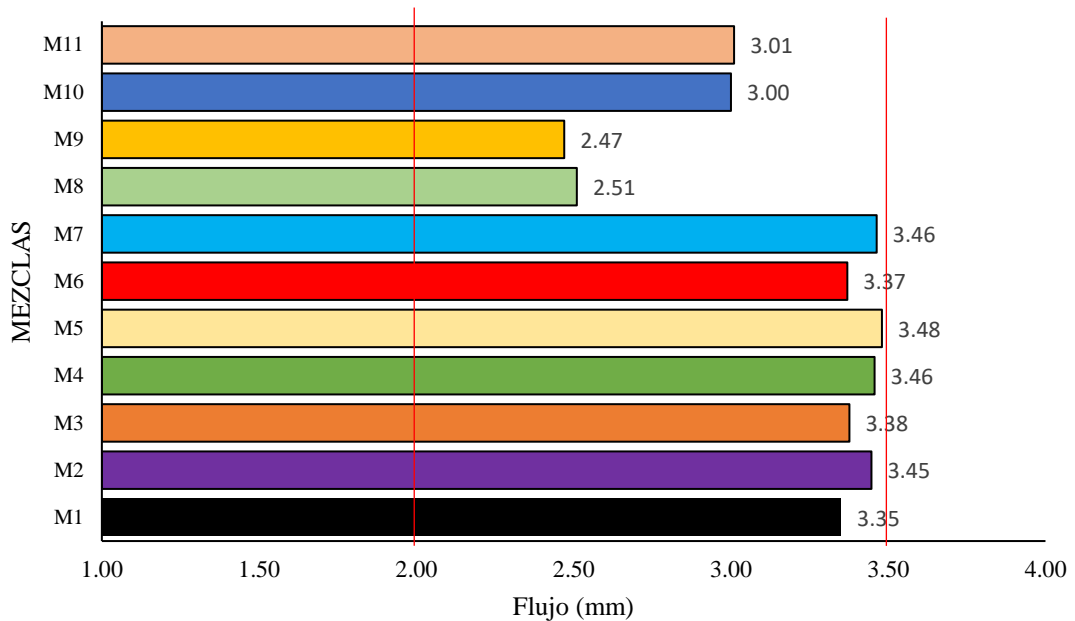
La mezcla M-10 elaborada sustituyendo parcialmente el agregado fino por BDF, presentó una estabilidad inferior en 17.1% respecto a la estabilidad de la mezcla M-1 y superior en 10.3% con respecto a la estabilidad mínima requerida. La mezcla M-11 elaborada sustituyendo totalmente la arena por BFD, presentó la menor estabilidad de todas las mezclas estudiadas. Sin embargo, la estabilidad de la mezcla M-11 es superior en 6.1% respecto al mínimo requerido. El comportamiento de la estabilidad de estas mezclas puede ser atribuido al aumento en el contenido de cemento asfáltico a causa de las características de porosidad y absorción del BFD.

4.2.3 Flujo. Teniendo en cuenta los criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, para la categoría de tránsito NT3, el flujo tiene que estar entre 2.0 mm y 3.5 mm. Los resultados de flujo se presentan en la figura 93.

Las mezclas que presentan valores bajos de flujo y valores muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas

mezclas que tienen valores altos de flujo son consideradas demasiado plásticas con tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

Figura 93. Comparación de los resultados de flujo



Fuente: El autor

El valor de flujo de la mezcla base (M-1) es de 3.35 mm, este valor cumple con los requerimientos. Las mezclas M-2, M-3, M-4, M-5, M-6 y M-7 reportaron un valor de flujo cercano al límite superior (3.5 mm). Esto puede ser atribuido a la utilización simultánea de escorias como agregado grueso y BFD como agregado fino, considerando el en la mayoría de los casos un aumento considerable en el contenido de cemento asfáltico debido a las características de estos materiales.

Los valores de flujo de las mezclas M-8 y M-9 fueron las más bajas con valores de 2.51 mm y 2.47 mm respectivamente, en estas mezclas no se utilizó BFD como agregado fino, por lo cual el contenido de cemento asfáltico no es tan alto. Lo anterior, ratificado con los valores de flujo de las mezclas M-10 y M-11, en las cuales se utilizó el BFD como agregado fino. El valor del flujo presenta un leve incremento en relación con las mezclas M-8 y M-9, pero no tan alto como en las demás mezclas analizadas.

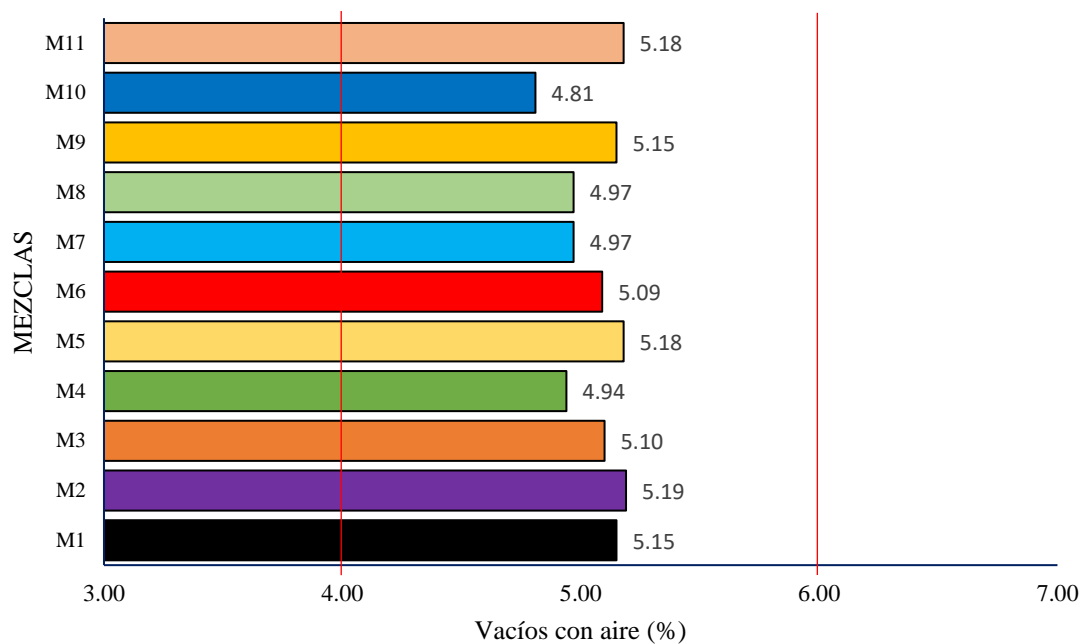
En general todas las mezclas cumplieron con el requerimiento del valor del flujo exigido en las especificaciones INVIAS 2013.

4.2.4 Vacíos con aire. Son los pequeños espacios de aire que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que las mezclas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional por acción del tránsito. El porcentaje requerido, para capas de rodadura, de acuerdo a los

criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías y para categoría de tránsito NT3, es de 4.0 % a 6.0 %. Todas las mezclas cumplen con este requerimiento.

La figura 94 muestra los resultados de los vacíos con aire de las mezclas elaboradas. La mezcla base (M-1) reportó 5.15 % de vacíos de aire. La mezcla M-2 presentó el porcentaje de vacíos con aire más alto con 5.19 %, mientras que la mezcla M-10 presentó el porcentaje de vacíos con aire más bajo con 4.81 %.

Figura 94. Comparación de vacíos con aire



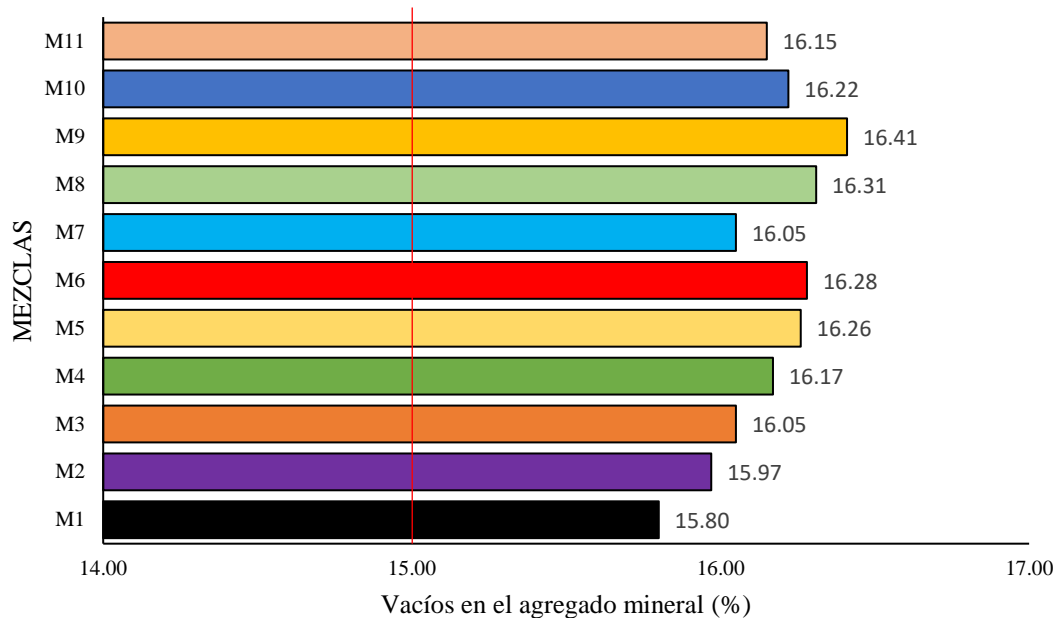
Fuente: El autor

La durabilidad de la capa asfáltica de rodadura es función del contenido de vacíos, dado que, a menor cantidad de vacíos, menor será la permeabilidad de la mezcla. Pero un contenido muy bajo de vacíos puede producir exudación del cemento asfáltico. Lo anterior, permite precisar que las mezclas elaboradas presentaron un contenido de vacíos adecuado que garantizan un buen comportamiento. Es decir, Los vacíos con aire en las mezclas presentaron valores muy similares, es decir que en este parámetro no tiene gran incidencia el tipo de agregado utilizado para elaborar las mezclas.

4.2.5 Vacíos en el agregado mineral VAM. Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregados en una mezcla asfáltica compactada, incluyendo los espacios que están llenos de cemento asfáltico. El valor mínimo para VAM, requerido en los criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías y para categoría de tránsito NT3, es de 15%. Todas las mezclas cumplen con este requerimiento.

Los resultados obtenidos para todas las mezclas se muestran en la figura 95. La mezcla base (M-1) tiene 15.80% de vacíos en el agregado mineral, siendo la mezcla que presentó menor valor. La mezcla M-9 reportó el porcentaje más alto con 16.41%.

Figura 95. Comparación de vacíos en el agregado mineral



Fuente: El autor

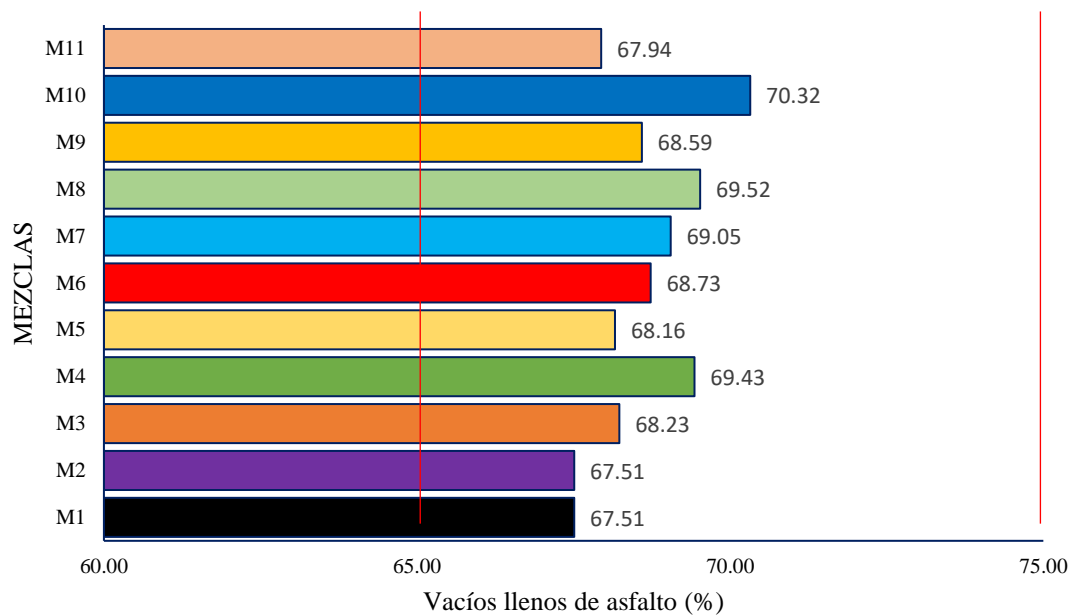
Todas las mezclas estudiadas presentaron mayor valor de vacíos en el agregado mineral que la mezcla base. La mezcla M-9 presentó un aumento de 3.8% respecto al VAM presentado en la mezcla base, siendo este el mayor aumento. Mientras que la mezcla M-2 presentó un aumento 1.1%, siendo este el menor incremento con respecto a la mezcla base.

El leve incremento en este parámetro puede ser atribuido al aumento del contenido de cemento asfáltico en cada una de las mezclas. Este aumento representa que estas mezclas presentan un mayor espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de cemento asfáltico.

4.2.6 Vacíos llenos de asfalto. Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado que se encuentran llenos de cemento asfáltico. El porcentaje requerido, de acuerdo a los criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías y para categoría de tránsito NT3, debe estar en el rango de 65.0 % a 75.0 %. Todas las mezclas cumplen con el requerimiento.

En la figura 96, se muestran los resultados de los vacíos llenos de asfalto de todas las mezclas elaboradas en este estudio.

Figura 96. Comparación de vacíos llenos de asfalto



Fuente: El autor

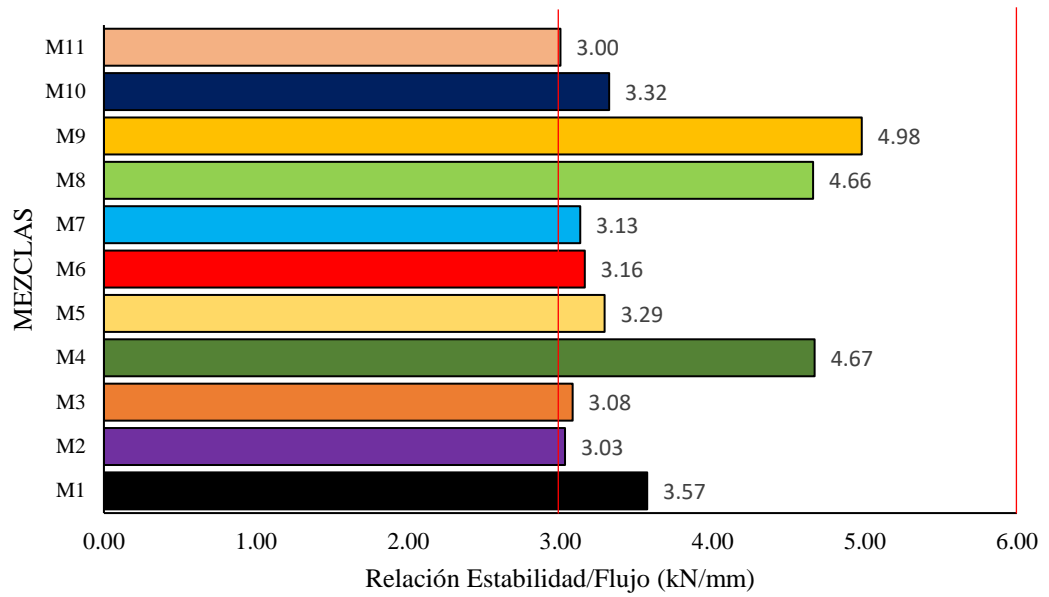
En la mezcla base (M-1) el valor es de 67.51% al igual que en la mezcla M-2, siendo estos los menores valores obtenidos. Las mezclas M-4 y M-11 presentan los mayores valores de vacíos llenos de asfalto, siendo estos 69.43 % y 70.32 % respectivamente.

4.2.7 Relación estabilidad/flujo. Esta es una medida de la rigidez de la mezcla. El requerimiento de este parámetro, de acuerdo a los criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías y para categoría de tránsito NT3, debe estar en el rango de 3.0 kN/mm a 6.0 kN/mm. Valores muy altos indican mezclas frágiles y rígidas, por otra parte, valores muy bajos indican mezclas plásticas y fácilmente deformables (Aranda & Clavijo, 2014).

El resultado de esta relación para la mezcla base (M-1) es de 3.6 kN/mm. Las mezclas M-2, M-3, M-6, M-7, M-10 y M-11 presentan relaciones cercanas al límite inferior del requerimiento, con valores entre 3.0 kN/mm y 3.32 kN/mm. Las mezclas M-4, M-8 y M-9 presentaron los valores más altos, con valores entre 4.66 kN/mm a 4.98 kN/mm, lo que indica que estas mezclas son un poco más rígidas que las demás mezclas. Lo que puede ser atribuido al aumento en la estabilidad de estas mezclas debido a las características de textura superficial y dureza de la escoria EAF. En la figura 97 se muestran los resultados, todas las mezclas cumplen con el requerimiento establecido por el Instituto Nacional de Vías para nivel de tránsito NT-3.

4.2.8 Relación llenante/ligante efectivo. Es la relación entre la fracción de material que pasa por el tamiz No. 200 y la película de cemento asfáltico que rodea los agregados (asfalto efectivo), con el fin de reducir los espacios vacíos de un concreto asfáltico.

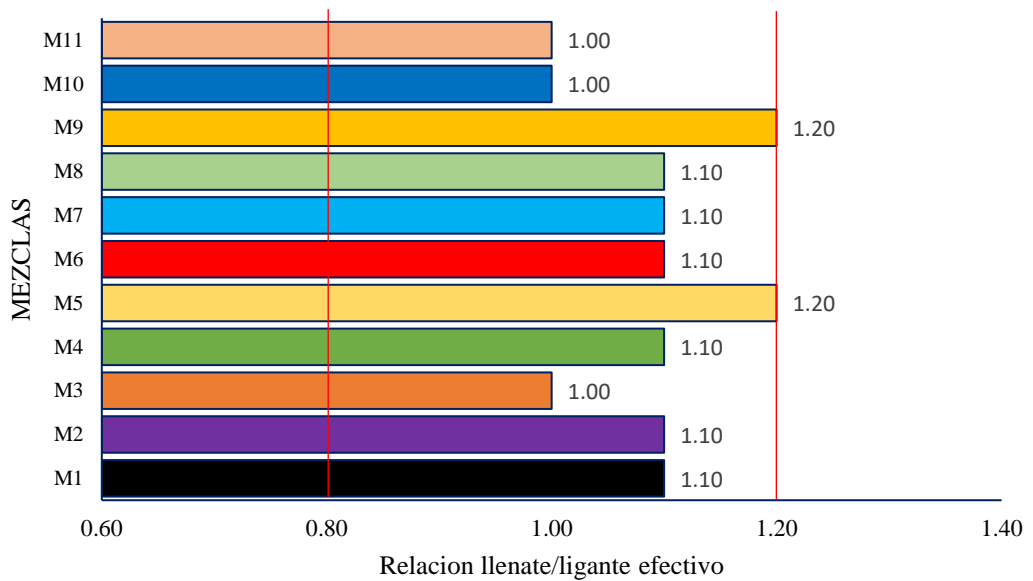
Figura 97. Comparación de relación estabilidad/flujo



Fuente: El autor

El requerimiento de este parámetro, de acuerdo a los criterios para el diseño de mezclas asfálticas del artículo 450 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías y para categoría de tránsito NT3, debe estar en el rango de 0.8 a 1.2. En la figura 98, se muestran los resultados, todas las mezclas cumplen con el requerimiento establecido por el INVIAS.

Figura 98. Comparación de relación llenante/ligante efectivo

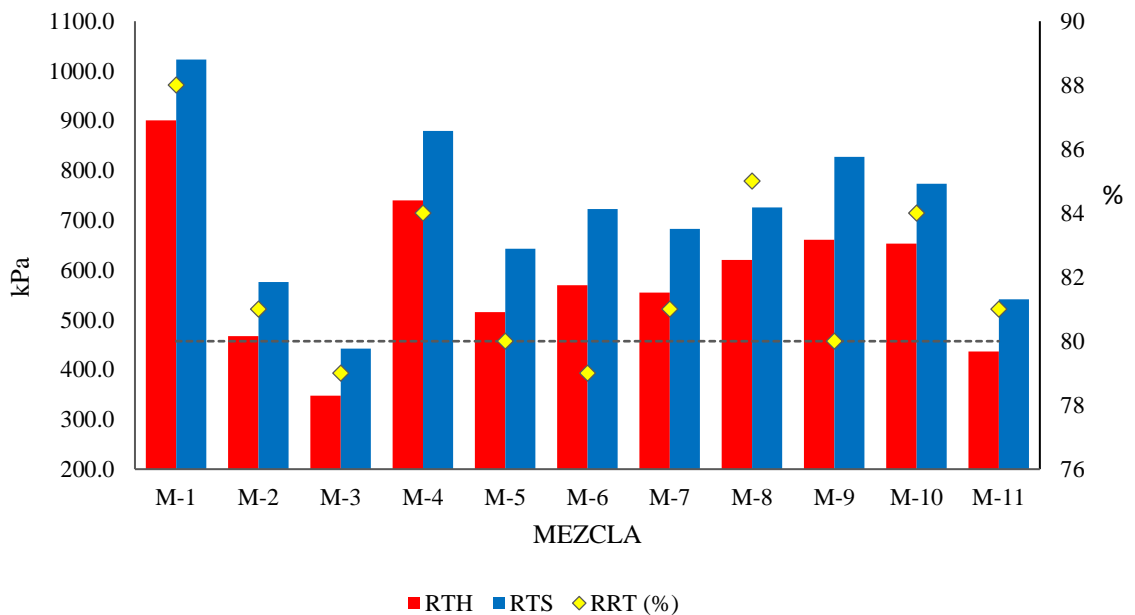


Fuente: El autor

Para la mezcla base (M-1) la relación llenante/ligante efectivo es de 1.10, valor que se encuentra dentro del rango estipulado. Las mezclas M-5 y M-9 presentaron el valor más alto de esta relación con 1.2, quedando en el límite superior del requerimiento. Las mezclas M-3, M-10 y M-11 reportaron la relación menor con un valor de 1.0. las mezclas M-2, M-4, M-6, M-7 y M-8 presentaron el mismo valor en la relación llenante/ligante efectivo que la mezcla base.

4.2.9 Susceptibilidad a la humedad. Las relaciones de resistencia a la tracción (RRT) de los diferentes diseños de mezcla asfáltica se muestran en la figura 99. De acuerdo con los criterios del Instituto Nacional de Vías en el Artículo 450-13, el valor de este parámetro debe ser mínimo 80% con el fin de garantizar que el daño por humedad no afecte el comportamiento de la mezcla asfáltica.

Figura 99. Resultados ensayo de resistencia a la tracción indirecta



Fuente: El autor

La mezcla base (M-1) presenta la mayor resistencia a tensión, tanto para las probetas ensayadas en seco como las probetas acondicionadas. En consecuencia, también esta mezcla presenta la mayor relación de resistencia a tensión (RRT) con un valor de 88%.

Las mezclas M-2, M-3 y M-11 presentan las menores resistencias a la tensión (RT_H y RT_S), sin embargo, la mezcla M-2 y M-11 cumplen con el requerimiento de RRT con un valor de 81%.

El valor de RRT para la mezcla M-3 es de 79%, un punto porcentual por debajo del mínimo requerido. El mismo caso se presenta con la mezcla M-6 cuyo valor de RRT es de 79%. Lo anterior, se puede atribuir a la presencia de escoria BOF como agregado grueso ya que este material es más susceptible a la degradación en condiciones de

humedad como quedó evidenciado en el ensayo de micro-deval.

Las demás mezclas cumplen con el requerimiento mínimo de RRT establecido por el INVIAS, así: la mezcla M-4 con un valor de 84%, la mezcla M-5 con un valor de 80%, La mezcla M-7 con 81%, la mezcla M-8 con 85%, la mezcla M-9 con 80% y la mezcla M-10 con un valor de RRT de 84%.

En la inspección visual de la superficie de falla de las muestras analizadas se determinó que las preparadas con 100% agregados minerales (mezcla M-1) y ensayadas en seco presentaron un mecanismo de falla asociado con la descomposición del agregado, mientras que las ensayadas en condición húmeda mostraron una superficie de falla que indicaba la rotura de la unión adhesiva entre el agregado y el cemento asfáltico. En contraste, las muestras fabricadas con BOF y BFD (M-2 y M-3) y ensayadas en seco y humedad en todos los casos presentaron un mecanismo de falla asociado a la descomposición de BOF, que puede atribuirse al comportamiento débil de la escoria BOF.

Las muestras elaboradas con la mezcla M-4 y ensayadas en seco la falla está asociada a la descomposición de la grava, y las ensayadas en estado húmedo la falla está asociada al desprendimiento del cemento asfáltico y el agregado. En contraste, las muestras elaboradas con la mezcla M-5 cuyos agregados son 100% EAF y BFD, y ensayadas en seco y humedad en ambos casos la falla está asociada a la rotura de la unión adhesiva entre el cemento asfáltico y la escoria EAF.

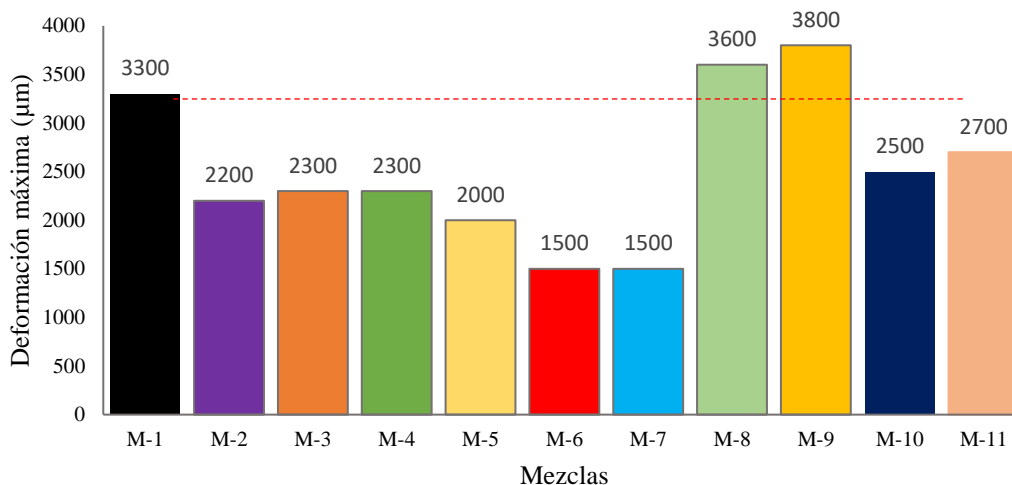
Las muestras elaboradas con las mezclas M-6 y M-7, y ensayadas en seco y humedad en todos los casos el mecanismo de falla predominante está asociado a la descomposición del agregado grueso, lo que puede atribuirse a la presencia de BOF en estas mezclas. Las muestras ensayadas en seco y humedad elaboradas con la mezcla M-8 y M-9, el mecanismo de falla predominante, en todos los casos, está asociado a la rotura de la unión adhesiva entre los agregados y el cemento asfáltico.

El mecanismo de falla de las muestras preparadas con las mezclas M-10 y M-11 es similar al mecanismo de falla observado en la mezcla base (M-1), es decir, las ensayadas en seco se observó descomposición del agregado y las ensayadas en humedad se observó que hubo pérdida entre la unión adhesiva del agregado y el cemento asfáltico.

Comparando con otros estudios: [J. S. Chen & Wei, \(2016\)](#) utilizaron escoria BOF como agregado grueso y encontraron una relación de resistencia a la tensión (RRT) entre las muestras acondicionadas y no acondicionadas de 86%. [Masoudi et al., \(2017\)](#) utilizaron escoria EAF como agregado grueso y caliza como agregado fino, en el ensayo de susceptibilidad a la humedad encontraron una relación de resistencia a la tensión (RRT) de 89%

4.2.10 Susceptibilidad a la deformación permanente. La deformación plástica del concreto asfáltico es uno de los principales fallos en los pavimentos, esto ocurre como consecuencia del efecto combinado de la repetición de cargas y las altas temperaturas. La deformación total de las diferentes mezclas se muestra en la figura 100, en la cual se comparan con la deformación total de la mezcla base (M-1).

Figura 100. Deformación total al final del ensayo



Fuente: El autor

Las mezclas M-8 y M-9 presentaron las mayores deformaciones al final del ensayo, el incremento con respecto a la mezcla base fue de 9% y 15% respectivamente. Las demás mezclas presentaron menor deformación total al final del ensayo respecto a la mezcla base (M-1).

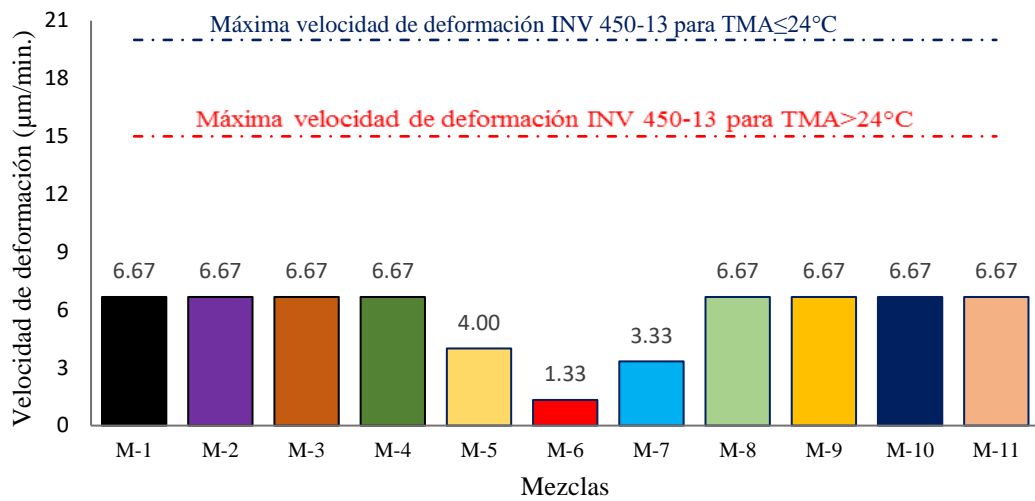
Las mezclas que presentaron menores deformaciones al final del ensayo fueron en las que se utilizó BFD en reemplazo parcial o total del agregado fino, mientras que las que presentaron mayor deformación fueron en las mezclas que no se utilizó BFD. Lo anterior se puede atribuir a la alcalinidad del BFD en asocio con la alcalinidad de las escorias lo cual indican una buena adhesión con el cemento asfáltico (Xie et al., 2012) (Peiwen & Dengliang, 1997).

La velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos de las mezclas se muestra en la figura 101. De acuerdo con los criterios del Instituto Nacional de Vías en el artículo 450-13, para temperatura media anual del aire mayor a 24 °C la velocidad máxima será de 15 µm/min., y para temperatura media anual del aire menor o igual a 24 °C la velocidad máxima será de 20 µm/min., y para un nivel de tránsito NT3.

Todas las mezclas cumplen con el requerimiento, la mezcla M-6 presentó la menor velocidad de deformación en dicho intervalo con un valor de 1.33 µm/min., seguida por la mezcla M-7 con un valor de 3.33 µm/min y la mezcla M-5 con un valor de 4.0 µm/min. Esta disminución en la velocidad de deformación puede atribuirse también a la alcalinidad de los materiales, teniendo en cuenta que las mezclas con menor velocidad de deformación son las mezclas elaboradas con sustituyendo parcial y totalmente el agregado grueso por escoria EAF y escoria BOF y el agregado fino por BFD.

Las demás mezclas mostraron la misma velocidad de deformación en el intervalo 105 a 120 minutos con un valor de 6.67 µm/min.

Figura 101. Velocidad de deformación en el intervalo 105 a 120 minutos



Fuente: El autor

Teniendo en cuenta la investigación de [J. S. Chen & Wei, \(2016\)](#), la profundidad del ahuellamiento en la mezcla que utilizó escoria BOF fue de aproximadamente 3.0 mm. En otros estudios, la resistencia a la deformación permanente, fue mayor en las mezclas con escoria EAF ([Ameri et al., 2013](#)), ([Li et al., 2015](#)), ([Wen et al., 2016](#)). Esto lo atribuyeron a las propiedades de la escoria como agregado grueso, a su angularidad y dureza.

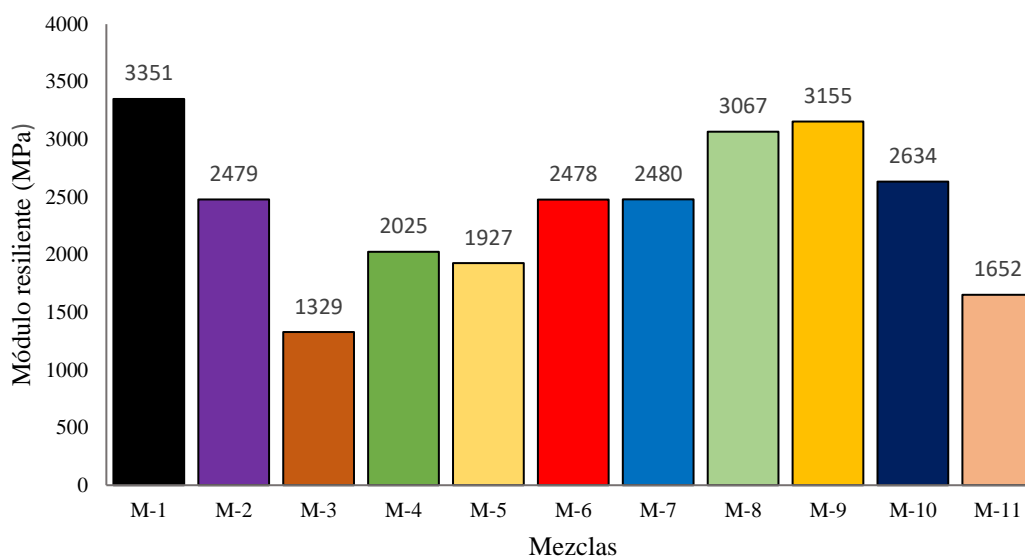
La susceptibilidad al daño por humedad y el comportamiento a la deformación permanente de un pavimento asfáltico con escoria BOF fue investigado por [Xie et al., \(2013\)](#), el estudio reveló que la interfaz entre la escoria BOF y el cemento asfáltico tenía una fuerza de unión. Esto lo atribuyeron a la alta alcalinidad de la escoria BOF lo cual está relacionado con el alto contenido de CaO.

4.2.11 Módulo resiliente. El módulo es una propiedad importante del concreto asfáltico en cualquier procedimiento mecanicista de diseño y análisis de pavimentos flexibles. El módulo resiliente es la propiedad del material requerida en el método empírico de diseño AASHTO y es un parámetro importante de entrada en la guía de diseño empírico-mecanicista. Este parámetro se ha constituido como un elemento fundamental en el diseño de pavimentos, por lo que ha sido introducido como un elemento que caracteriza de manera racional el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales que conforman la estructura ([Elizondo et al., 2008](#)).

En la figura 102, se muestra el comparativo del resultado de los módulos resilientes para cada una de las mezclas objeto de estudio a 20 °C de temperatura de la mezcla. El módulo resiliente de la mezcla base (M-1) es de 3351 MPa, siendo este el valor más alto de todas las mezclas ensayadas. Para las mezclas M-8 y M-9, el valor obtenido del módulo resiliente está muy cercano al valor del módulo resiliente de la mezcla base, con valores de 3067 MPa y 3155 MPa respectivamente.

El menor módulo resiliente se obtuvo en la mezcla M-3 con un valor de 1329 MPa, lo cual se puede atribuir a que esta mezcla fue elaborada con 100% de BOF como agregado grueso y este material presenta un comportamiento débil en comparación con los demás materiales utilizados. Para la mezcla M-11 también se obtuvo un módulo resiliente bajo con un valor de 1652 MPa, esta mezcla fue elaborada con 100% BFD como agregado fino, este valor puede ser atribuido al aumento en el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y a la textura superficial de este material.

Figura 102. Módulos resilientes de las mezclas a 20°C



Fuente: El autor

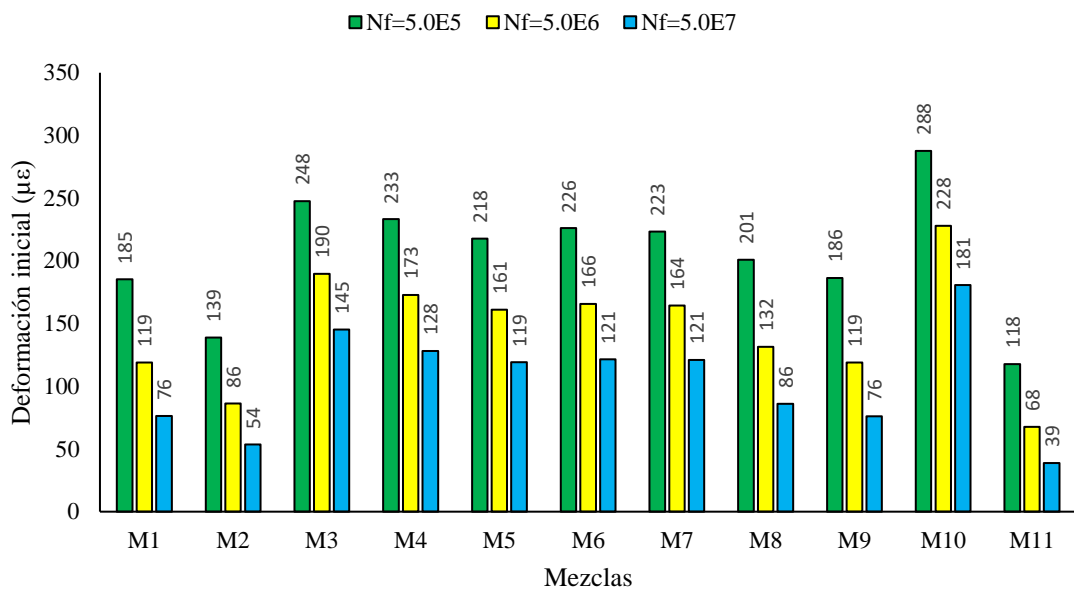
Las mezclas que se fabricaron con BFD en reemplazo parcial o total del agregado fino muestran módulos resilientes más bajos a 20 °C que las mezclas que no utilizaron BFD. Sin embargo, a temperaturas más altas estas mezclas presentan un módulo resiliente mayor que el módulo resiliente de la mezcla base, esto se puede ver en las figuras de líneas de tendencia de los módulos resilientes. Lo anterior puede ser atribuido a la temperatura a la cual se produce la escoria BOF, la escoria EAF y el BFD; las cuales hacen que estos materiales tengan capacidad de absorber energía térmica y puedan aumentar el efecto de almacenamiento de calor en el concreto asfáltico (Huang et al., 2012).

En las mezclas M-8 y M-9, en las cuales no se utilizó BFD como agregado fino, el módulo resiliente obtenido para una temperatura de 20 °C es levemente inferior al módulo resiliente de la mezcla base a la misma temperatura. De forma semejante, en el estudio realizado por Masoudi et al., (2017), en el cual utilizaron escoria EAF como agregado grueso, reportaron un módulo resiliente de 3144 MPa, similar al reportado por esta investigación. Sin embargo, en un estudio realizado por Marco Pasetto & Baldo, (2017), utilizaron 30% de escoria BOF como agregado grueso y encontraron un módulo a 20 °C de 8642 MPa, el cual es superior a los reportados por la presente investigación.

4.2.12 Leyes de Fatiga. La vida a fatiga se define como el número de ciclos de carga (N_f) hasta que ocurre la falla en mezclas asfálticas y representa la capacidad de la mezcla para soportar las cargas cíclicas del tránsito (Muniandy et al., 2014).

La prueba de fatiga se realizó para determinar la vida de fatiga de las mezclas estudiadas en esta investigación. La figura 103 muestra las deformaciones iniciales para las mezclas y para tres diferentes ciclos de carga (N_f) calculadas de acuerdo a las ecuaciones de las leyes de fatiga presentadas en el capítulo anterior.

Figura 103. Deformaciones iniciales



Fuente: El autor

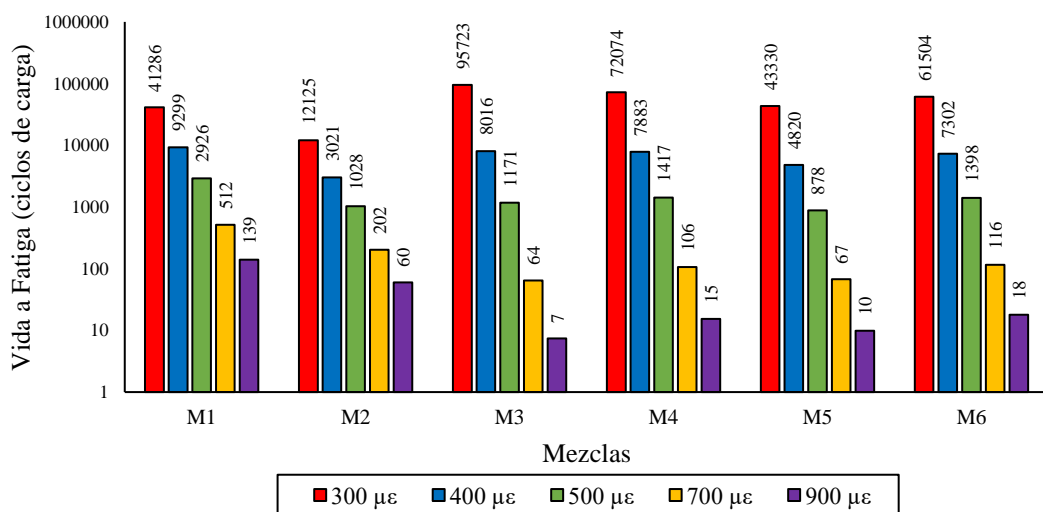
Para 5.0×10^5 ciclos de carga, la mezcla M-10 presentó la más alta deformación inicial ($\epsilon_0=288 \mu\epsilon$) la cual es 55 % superior a la deformación inicial de la mezcla base (M-1) para los mismos ciclos de carga. De igual forma, para 5.0×10^6 ciclos de carga la deformación inicial de la mezcla M-10 es superior en 91.5 % respecto de la mezcla M-1 para el mismo número de ciclos de carga. Siguiendo la misma tendencia, para 5.0×10^7 ciclos de carga la mezcla M-10 presentó una deformación inicial superior en 138 % respecto a la mezcla M-1 y para los mismos ciclos de carga.

La mezcla M-9 presentó deformaciones iniciales similares a la mezcla M-1 para los niveles de ciclos de carga. Las mezclas M-2 y M-11 presentaron deformaciones iniciales menores, para los tres niveles de ciclos de carga, en relación con la mezcla M-1. Las demás mezclas presentaron deformaciones iniciales superiores a la deformación inicial obtenida para la mezcla M-1, en todos los niveles de ciclos de carga. Es decir, con excepción de las mezclas M-2 y M-11, las mezclas analizadas en este estudio presentan una mejor vida a la fatiga que la mezcla base, lo cual se puede atribuir en gran medida a la mayor cantidad de cemento asfáltico, a la textura superficial de las escorias y a la afinidad entre las escorias y el cemento asfáltico como se ha planteado anteriormente.

Algo semejante ocurre en investigaciones realizadas por otros autores como: [Asi, \(2007\)](#) encontró mejoras en la vida a fatiga de las mezclas con escoria EAF en una sustitución del 25% a 50% de la fracción gruesa, esto lo atribuyó a la angulosidad de la escoria EAF. Para [Ziari et al., \(2015\)](#) la escoria EAF aumenta la vida a la fatiga de las mezclas cuando se utiliza en fracción gruesa o fina. En el estudio realizado por [A Kavussi et al., \(2016\)](#) la vida a fatiga obtenida en la prueba por flexión en cuatro puntos, confirmo que las mezclas que contenían escoria EAF tenían una mayor vida a fatiga, los autores de esta investigación lo atribuyeron a la gran angularidad de la escoria EAF, lo cual aumenta el ángulo de fricción interna de la mezcla y mejora la acomodación de las partículas, así como una mejor adherencia entre el cemento asfáltico y la escoria EAF, lo que hace más lento el agrietamiento.

La vida de fatiga de la mezcla base y las demás mezclas a diferentes niveles de deformación se presentan en la figura 104 y figura 105. En la figura 104 se puede observar que para una deformación $\epsilon_0=300 \mu\epsilon$, las mezclas M-3, M-4, M-5 y M-6 tienen vidas de fatiga más altas que la mezcla base (M-1). A medida que aumentamos la deformación, es decir, a deformaciones altas estas mezclas presentan menor vida de fatiga que la mezcla base. La mezcla M-2 independiente del nivel de deformación presenta una vida a fatiga menor que la mezcla base.

Figura 104. Vida a fatiga a diferentes deformaciones mezcla M-1, M-2, M-3, M-4, M-5 y M-6.

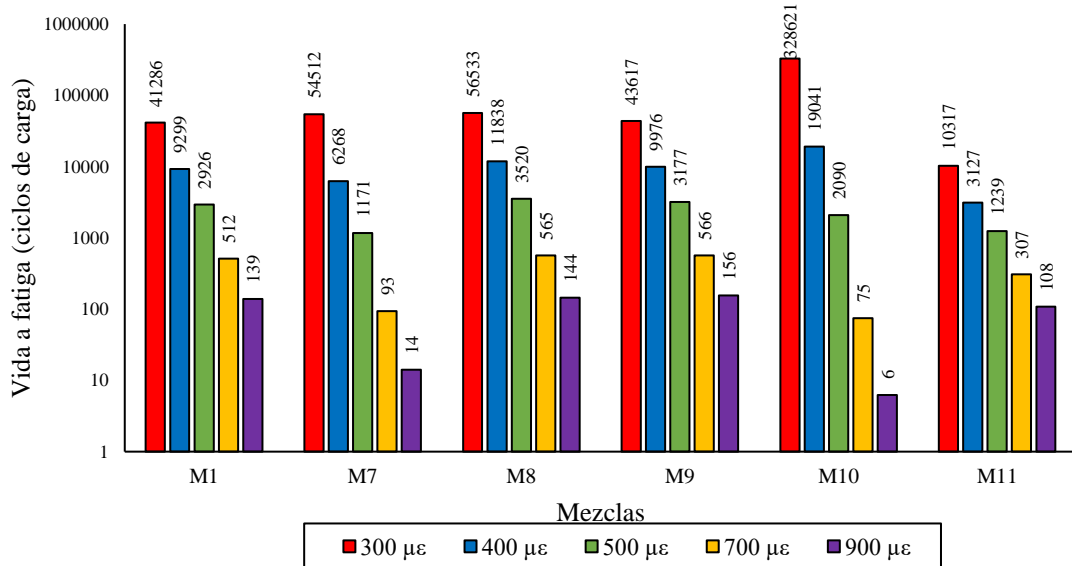


Fuente: El autor

En la figura 105 se puede observar que para una deformación $\epsilon_0=300 \mu\epsilon$, la mezcla M-10 presenta la mejor vida a fatiga, respecto a todas las mezclas estudiadas. En consecuencia, a medida que se aumenta la deformación, la vida a fatiga de la mezcla M-10 disminuye hasta el punto de ser la menor vida a fatiga. Las mezclas M-7, M-8 y M-9 tienen vidas a fatiga más altas que la mezcla base a una deformación $\epsilon_0=300 \mu\epsilon$. A medida que aumentamos el valor de la deformación, las mezclas M-8 y M-9 siguen presentando mejor vida a fatiga que la mezcla base. Lo contrario ocurre con la mezcla M-7, que al aumentar

la deformación la vida a fatiga es menor. La mezcla M-11 independiente del nivel de deformación presenta una vida a fatiga menor que la mezcla base.

Figura 105. Vida a fatiga a diferentes deformaciones mezcla M-1, M-7, M-8, M-9, M-10 y M-11.



Fuente: El autor

En general, la mayoría de mezclas estudiadas presentan mejor vida a fatiga a bajas deformaciones que la vida a fatiga de la mezcla base. Las mezclas M-2 y M-11 presentan menor vida a fatiga que la mezcla base. Por lo anterior, se puede intuir que el uso de escoria EAF, escoria BOF y BFD en concretos asfálticos mejora la vía a fatiga de las mezclas, lo que puede ser atribuido a la textura superficial de las escorias, a la fuerza de unión entre el cemento asfáltico y las escorias atribuido a la alta alcalinidad de estos materiales. Lo anterior demostrado también por otros autores como se describió anteriormente.

4.2.13 Influencia de BFD en el comportamiento mecánico a través del tiempo.

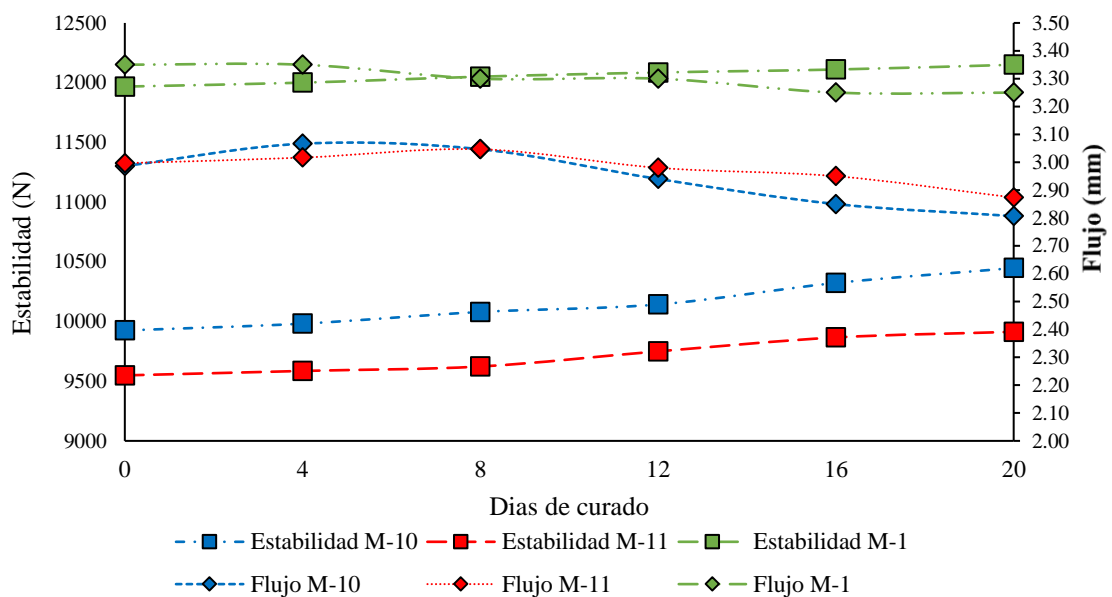
Considerando que el BFD es el material nuevo implementado en esta investigación, se desarrolló un análisis para determinar si el BFD tenía alguna influencia en el comportamiento mecánico del concreto asfáltico a través del tiempo.

Con las mezclas que se sustituía el agregado fino natural por BFD (M-10 y M-11), se realizó dicho análisis. Se fabricaron 18 probetas adicionales de cada mezcla las cuales en grupos de tres (3) fueron ensayadas a 0, 4, 8, 12, 16 y 20 días, para determinar la estabilidad Marshall y el flujo. Para establecer una comparación de los resultados, se fabricaron 18 probetas adicionales de la mezcla base (M-1) y se ensayaron a los mismos periodos de tiempo. Todas las probetas fueron dejadas a la intemperie para simular las condiciones de servicio.

En la figura 106 se presentan los resultados de este análisis. En la mezcla M-10 se presentó un aumento gradual en la estabilidad así: para las probetas ensayadas a los 4 días el incremento fue de 0.6%, para las probetas ensayadas a los 8 días fue de 1.6%, en las probetas ensayadas a los 12 días fue de 2.2%, en las probetas ensayadas a los 16 días fue de 4.0% y en las probetas ensayadas a los 20 días fue de 5.3%. El incremento se midió respecto a la estabilidad de las probetas ensayadas para diseño.

En consecuencia, para la mezcla M-10 el flujo en las probetas ensayadas a los 4 y 8 días aumentó en 2.7% y 2.0% respectivamente, las probetas ensayadas a los 12, 16 y 20 días presentaron una disminución del 1.6%, 4.6% y 6.0% respectivamente. Este cambio se midió respecto al flujo de las probetas ensayadas para diseño.

Figura 106. Influencia de BFD en la estabilidad y flujo a través del tiempo



Fuente: El autor

La mezcla M-11 presentó un comportamiento similar a la mezcla M-10, incremento gradual en el valor de la estabilidad así: El promedio del valor de estabilidad en las probetas ensayadas a los 4 días tuvo un incremento de 0.4 %, las ensayadas a los 8 días el valor de la estabilidad se incrementó en 2.1 %, el incremento de las ensayadas a los 12, 16 y 20 días fue de 2.1 %, 3.3 % y 3.8 % respectivamente. Con respecto al flujo, en las probetas ensayadas a los 4 y 8 días se presentó un incremento de 0.7 % y 1.7 % respectivamente, a partir de las probetas ensayadas a los 12 días se evidenció una disminución en el valor del flujo hasta tener un valor menor del flujo de diseño en 4.1 % para las probetas ensayadas a los 20 días. El incremento en la estabilidad y la disminución del flujo en estas mezclas puede ser atribuido a la absorción de cemento asfáltico por parte del BFD, lo cual debido al curado y a la mayor afinidad con el cemento asfáltico hace que la mezcla adquiera más rigidez.

La mezcla base (M-1) presentó un comportamiento similar. Sin embargo, el aumento en el valor de estabilidad para las probetas ensayadas a los 20 días solo fue del 1.5 %,

mientras que para las mezclas M-10 y M-11 fue de 5.3 % y 3.8 % respectivamente. En el valor de flujo, la disminución fue de 3.0 % en las probetas ensayadas a los 20 días y en las mezclas M-10 y M-11 fue de 6.0 % y 4.6 % respectivamente.

Con los resultados obtenidos es visible que la utilización de BFD tiene una leve mejora de las características mecánicas de las mezclas a través del tiempo. Este efecto está asociado a la textura superficial rugosa y porosa de este material, al ser un material poroso, este absorbe una mayor cantidad de cemento asfáltico que con el paso del tiempo se adhiere a las paredes y mejora la adherencia entre los agregados y el cemento asfáltico.

4.2.14 Comportamiento del cemento asfáltico modificado con EAFD. Los pavimentos flexibles están sometidos a diversas sollicitaciones mecánicas y ambientales, las cuales producen deterioros en los mismos. Una de las fallas más comunes es la fisuración por fatiga. Existen diferentes ensayos para realizar la evaluación en las mezclas asfálticas, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado ensayos que permiten predecir este comportamiento de las mezclas a partir de la evaluación del cemento asfáltico (Ayala & Anguas, 2016).

En relación con la modificación del cemento asfáltico con EAFD se presenta el siguiente análisis: Para los cementos asfálticos modificados sin envejecer el grado de desempeño a altas temperaturas continúa en 64 °C, mientras que para los asfaltos envejecidos en RTFO el grado de desempeño aumentó a 70 °C. En los asfaltos envejecidos en RTFO+PAV el grado de desempeño a temperaturas intermedias sigue en 22 °C. El aumento del grado de desempeño de 64 °C a 70 °C indica que los asfaltos modificados y envejecidos en RTFO son más resistentes a fenómenos como el ahuellamiento en climas de alta temperatura (Castro et al., 2016).

Para evitar el ahuellamiento, el cemento asfáltico debe ser lo suficientemente rígido y elástico, para esto $G^*/\text{sen}\delta$ debe ser alto. El cemento asfáltico no debe ser tan blando a altas temperaturas, G^* alto indica que el cemento asfáltico es más rígido (resistente a deformaciones) y δ menor indica la presencia elástica (recupera deformaciones). Es decir, que el cemento asfáltico modificado con 10% de EAFD presenta las mejores características para cumplir los requerimientos anteriormente descritos, presentando un valor de $G^*/\text{sen}\delta = 3.2$ kPa a 70 °C, levemente superior que los cementos asfálticos modificados con 3% y 6% de EAFD. En consecuencia, $G^*=3.18$ kPa para el cemento asfáltico EAFD-10 es el más alto lo que indica que es el cemento asfáltico más rígido y más resistente a deformaciones y $\delta=76.9^\circ$ para el mismo cemento asfáltico es el menor valor lo que indica que el cemento asfáltico es elástico y puede recuperar las deformaciones. Para evitar el agrietamiento por fatiga, la mezcla debe ser elástica pero no tan rígida. Para esto $G^* \text{sen}\delta$ debe ser mínimo. El cemento asfáltico no debe ser tan duro ni frágil, G^* bajos indica que el cemento asfáltico es menos rígido y δ con valores altos indica menor componente elástico. Por consiguiente, la incorporación de 10% de EAFD en el cemento asfáltico es perjudicial para controlar el agrietamiento por fatiga, lo cual puede ser atribuido a la rigidez que aporta el EAFD.

En relación al ensayo de recuperación elástica (MSCR), se evidencia que con la adición de EAFD, el cemento asfáltico presenta menos deformación tanto para esfuerzo de 0.1

kPa como para esfuerzo a 3.2 kPa. El efecto es el mismo con la adición de 6% y 10 %. Por lo tanto, el porcentaje de recuperación (R) aumenta, para los dos niveles de esfuerzo, y proporcional al aumento de EAFD. De la misma manera, la cantidad de deformación residual que queda en la muestra después de los ciclos de esfuerzo y recuperación también disminuye con la adición de EAFD.

De acuerdo con las especificaciones de la AASHTO y a los resultados del ensayo MSCR, el cemento asfáltico sin la adición de EAFD sería recomendado a utilizar para la fabricación de un concreto asfáltico a utilizar en una vía con un nivel de tránsito menor a 10 millones de ejes equivalentes de diseño y los cementos asfálticos modificados con EAFD serían recomendados para concretos asfálticos a utilizar en vías con niveles más altos de tránsito (10 a 30 millones de ejes equivalentes de diseño). Lo cual se puede atribuir a que con la presencia de EAFD el cemento asfáltico se vuelve más rígido y resistente a las deformaciones.

4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO.

La evaluación se realizó con el objetivo de establecer la factibilidad económica de la utilización de los residuos usados en esta investigación. Para lo cual se realizó el cálculo del valor unitario por metro cúbico de la elaboración en planta de cada una de las mezclas y posteriormente se diseñaron estructuras de pavimento flexible utilizando cada una de las mezclas. Teniendo en cuenta el costo unitario de cada mezcla y el espesor de la carpeta asfáltica, se realizó una comparación del costo que tendría la mezcla asfáltica para construir un kilómetro de vía.

4.3.1 Precio unitario de cada mezcla. Para calcular el precio unitario de cada mezcla, se tomaron en cuenta los precios de referencia del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) para el departamento de Boyacá en el año 2018. También se consideró que la planta de producción de la mezcla asfáltica se encuentra localizada en la ciudad de Tunja, por lo cual se tuvo en cuenta el valor de cada material en el sitio de producción y su respectivo acarreo hasta la planta. En la tabla 42 se presentan los precios de adquisición de cada material en el sitio de producción y la distancia de acarreo hasta la ciudad de Tunja.

Tabla 42. Distancia de acarreo y precio de adquisición de materiales

Material	Distancia acarreo (Km)	Precio (\$)	Unidad
Grava	56	56.600	m ³
Arena	56	30.500	m ³
Arena Trituración	56	43.000	m ³
EAF	25	18.000*	m ³
BOF	71	20.000**	m ³
BFD	71	15.000**	m ³
Cemento Asfáltico 60-70	125	1.238.790	Ton.

*Dato suministrado por Ing. Yuber Oswaldo Acosta. Ingeniero Control Ambiental. Gerdau-Diaco (mayo 2018)

**Dato suministrado por Ing. Omar González Beltrán. Director Comercial. Acerías Paz del Rio S.A. (junio 2018)

Fuente: El autor

En la tabla 43 se presentan los precios unitarios por metro cúbico de cada una de las mezclas. En el **Anexo D**, se muestran cada uno de los análisis de precios unitarios.

Tabla 43. Precio unitario de cada mezcla por m³

Id Mezcla	Precio Unitario
M-1	\$364.986
M-2	\$399.900
M-3	\$401.670
M-4	\$346.055
M-5	\$374.355
M-6	\$343.017
M-7	\$376.626
M-8	\$340.997
M-9	\$318.161
M-10	\$378.907
M-11	\$390.458

Fuente: El autor

4.3.2 Diseño de estructuras de pavimento. Se realizó la evaluación económica del diseño de estructuras de pavimento flexible utilizando cada una de las mezclas elaboradas en el estudio.

Para el diseño de la estructura de pavimento flexible se utilizó la metodología AASHTO-93 (AASHTO, 1993). Siguiendo la metodología, se tomó un nivel de confianza del 90 %, tránsito de diseño ESAL=5.0*10⁶ ejes equivalentes de 8.2 ton., periodo de diseño 10 años y se asumió una resistencia de la superficie de apoyo CBR=5.0 %.

Para la subbase granular, se tomó el valor mínimo requerido de resistencia para una subbase granular clase A, CBR= 40 %, de acuerdo con el artículo 320-13 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto nacional de Vías INVIAS. De igual forma, para la base granular, se tomó el valor mínimo requerido de resistencia para una base granular clase A, CBR=95 %, de acuerdo al artículo 330-13 del INVIAS.

Cabe mencionar que en cada diseño solo se modificó el tipo de mezcla, se utilizaron los módulos resilientes obtenidos y se han fijado los valores de CBR de la capa de base, subbase y subrasante, para observar la variación del espesor de la carpeta asfáltica solamente. En la tabla 44 se muestran los resultados de los espesores del diseño de cada una de las estructuras de pavimento.

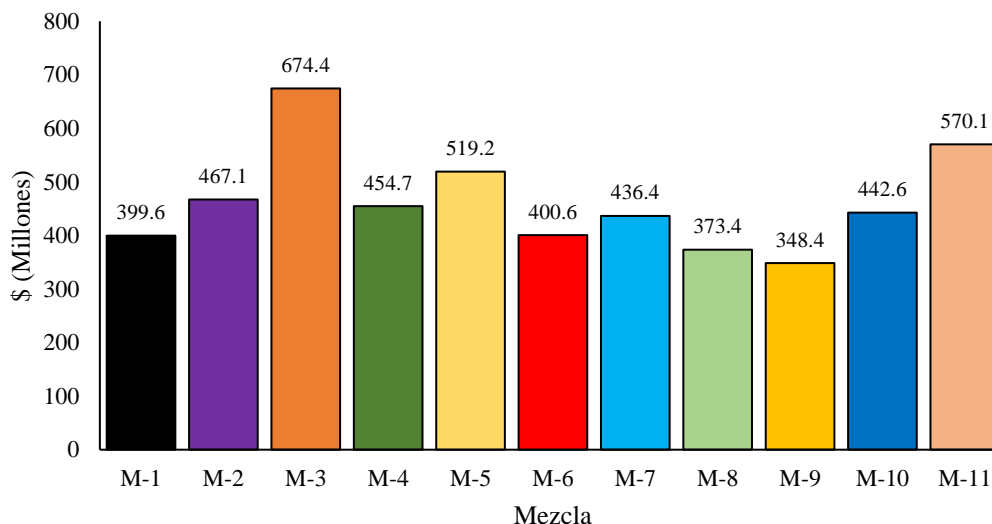
La cantidad de concreto asfáltico necesario para realizar la pavimentación se calculó teniendo en cuenta el espesor de la carpeta asfáltica de cada diseño, un ancho de calzada de 7.30 metros y 1.0 kilómetro de vía. Se determinó el costo del concreto asfáltico considerando el precio unitario de cada mezcla en planta. En la figura 107, se presentan los resultados del valor de adquisición para cada tipo de mezcla y la comparación respecto a la mezcla base (M-1).

Tabla 44. Resultado de espesores de diseño

Id Mezcla	Espesores de diseño de pavimento (cm)		
	Carpeta asfáltica	Base granular	Subbase granular
M-1	15	15	25
M-2	16	15	25
M-3	23	15	25
M-4	18	15	25
M-5	19	15	25
M-6	16	15	25
M-7	16	15	25
M-8	15	15	25
M-9	15	15	25
M-10	16	15	25
M-11	20	15	25

Fuente: El autor

Figura 107. Precio adquisición concretos asfálticos en planta (Millones de pesos)



Fuente: El autor

4.4 ANÁLISIS AMBIENTAL.

La industria siderúrgica durante la producción de acero, genera desechos, los cuales en su mayoría generan algún tipo de impacto al medio ambiente. Los desechos se pueden dividir en tres grupos: Desechos líquidos, los cuales se utilizan para limpiar el acero, estos residuos pueden ir a parar a los ríos o lagos contaminando el agua y suponiendo un peligro para la salud de las personas (Ma et al., 2018). Desechos gaseosos, surgen del alto horno, la acería y demás plantas que hacen parte de todo el proceso industrial, estos gases son principalmente, monóxido de carbono y sulfato de hidrógeno, los cuales son altamente tóxicos (Yu, Li, Shi, & Qian, 2015). Y desechos sólidos, los cuales son análisis del estudio, estos desechos en su gran mayoría no tienen uso alternativo si no que son depositados en patios de almacenamiento.

Por otra parte, la explotación de materiales para construcción genera impacto ambiental ya que estos materiales son no renovables. El impacto ambiental ocasionado por la minería, a pesar del aumento en la reglamentación, se constituye como un tema de preocupación para las organizaciones del estado que tienen deber de preservar el ecosistema del país.

En Colombia, el 40% de los títulos mineros pertenecen a la operación extractiva de los materiales para la construcción en los que sobresale la producción de grava, arena y recebo (López Suárez, 2017). La demanda actual de estos materiales, para todos los sectores, está en 47 millones de toneladas aproximadamente. Por otra parte, teniendo en cuenta los proyectos de infraestructura vial de cuarta y quinta generación, que en su mayoría son doble calzadas, se espera una demanda de 75 millones de toneladas adicionales durante todo el periodo que dure la construcción (Mariño, 2016).

En el año 2017, la explotación y consumo de materiales de construcción crecieron en un 5% con respecto al año 2016. La explotación de arena fue de 2.978.530 m³ y la explotación de grava fue de 7.104.576 m³ a nivel nacional. En Boyacá, la explotación de arena fue de 79.402 m³ y de grava fue de 160.879 m³ (Minería, 2018).

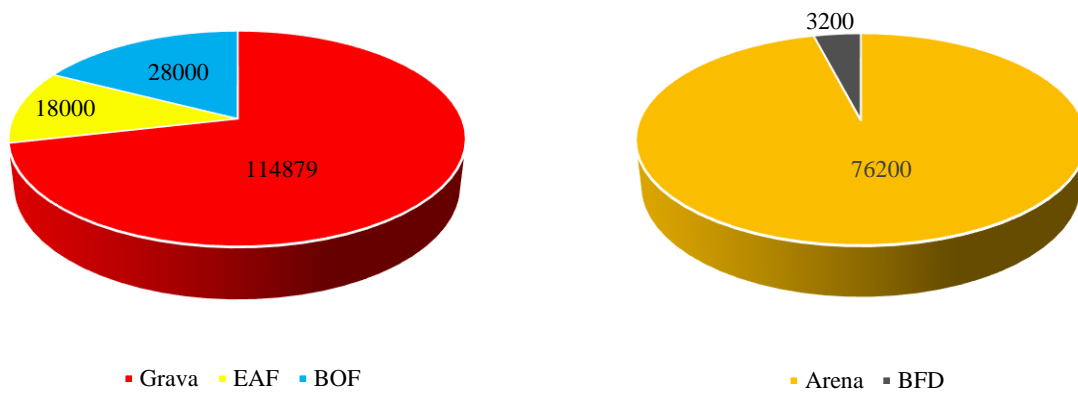
En la empresa Gerdau-Diaco, la producción anual de escoria EAF es de 18.000 m³, según información recibida de Yuber Oswaldo Acosta, Ingeniero de Control Ambiental. En Acerías Paz del Río S.A., la producción anual de escoria BOF baja en fósforo es de 28.000 m³ y de BFD es de 3.200 m³, según información de Rousmary González Pachón, Ingeniera de Proyectos. Estos residuos en la mayoría de los casos no tienen ningún uso alternativo, los cuales se almacenan en patios al aire libre.

Si esa producción de residuos se utilizara en la fabricación de concretos asfálticos para la pavimentación de vías, se disminuiría la acumulación en los patios de almacenamiento y se podría reducir considerablemente la explotación de grava y arena. Esta reducción influiría en la preservación de recursos naturales no renovables. Todo lo anterior tendrá incidencia en la parte de la conservación y mejora del medio ambiente.

En la figura 108 se muestra la reducción en la explotación, de material tipo grava, que se lograría si se utilizaran las escorias (EAF y BOF) como materiales alternativos. De los 160.879 m³ explotados en el año 2017, solo hubiera sido necesario la explotación de 114.879 m³, para una reducción del 28.6%.

De la misma forma, se muestra la reducción en la explotación, de material tipo arena, que se lograría con la utilización de BFD como material alternativo. De los 79.400 m³ explotados en el año 2017, solo hubiera sido necesario la explotación de 76.200 m³, para una reducción del 4%.

Figura 108. Reducción de explotación de materiales granulares naturales.



Fuente: El autor

5. CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

La principal motivación de esta tesis fue la de investigar la factibilidad de reemplazar parcial o totalmente los agregados naturales utilizados en la fabricación de concretos asfálticos por escoria de horno de arco eléctrico (EAF) y escoria de horno al oxígeno (BOF) como agregado grueso y polvo de alto horno (BFD) como agregado fino. El análisis se orientó en el estudio de varias combinaciones: reemplazando parcialmente (50%) el agregado grueso por BOF y EAF de manera independiente y reemplazando parcialmente (50%) el agregado fino por BFD en cada caso, reemplazando totalmente (100%) el agregado grueso por BOF y EAF de manera independiente y sustituyendo totalmente el agregado fino por BFD en cada caso, reemplazando parcialmente el agregado grueso por BOF y EAF simultáneamente y sustituyendo parcialmente el agregado fino por BFD, sustituyendo totalmente el agregado grueso por la combinación de BOF - EAF y reemplazando totalmente el agregado fino por BFD, reemplazando parcial y totalmente el agregado grueso por EAF sin sustituir el agregado fino, sustituir parcial y totalmente el agregado fino por BFD sin sustituir el agregado grueso y una mezcla con los agregados naturales utilizados normalmente que será la mezcla base para la comparación de los resultados.

Los concretos asfálticos fueron diseñados con la metodología Ramcodes y una vez encontradas las fórmulas de trabajo fueron analizadas frente a sus propiedades físicas, mecánicas y a las pruebas de desempeño. Durante la realización de este trabajo, todos los objetivos propuestos fueron alcanzados. Los resultados obtenidos aportaron información técnica y concluyente sobre el comportamiento y desempeño de las mezclas.

Las conclusiones encontradas son compiladas en este capítulo y resuelven las preguntas de la investigación: ¿qué propiedades físicas y químicas tienen los residuos sólidos de la producción de acero?, de acuerdo a esas propiedades y a la comparación con materiales granulares normalmente utilizados en capas estructurales para pavimentos ¿qué tipo de sustitución podría llevarse a cabo? y ¿qué cambios en el impacto ambiental se podrían generar con la utilización de estos residuos y la sustitución de agregados naturales?

Por otra parte, este capítulo contiene las principales implicaciones de las contribuciones de la tesis. Sobre esto se presenta un análisis técnico y económico de las mezclas elaboradas. Además, son presentadas varias perspectivas que podrían derivar futuras investigaciones, las cuales el autor considera importante realizar, con el fin de continuar en la línea de investigación de los residuos industriales producidos en la región de Boyacá y su posible utilización en la fabricación de concretos asfálticos para pavimentos. La conveniencia de estas investigaciones obedece a las características industriales de la región.

5.2 SOBRE LAS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta cada una de las preguntas de investigación planteadas, las

conclusiones que se han definido, a partir de los resultados experimentales, son las siguientes:

5.2.1 ¿Qué propiedades físicas y químicas tienen los residuos sólidos de la producción de acero?

El primer paso a seguir para poder utilizar los residuos sólidos (escoria EAF, escoria BOF y BFD) de la producción de acero en concretos asfálticos consiste en la validación del cumplimiento de todos los requerimientos y exigencias establecidas en la normatividad relacionada con el tema. Después de recolectar el material en los patios de almacenamiento, se realizaron los ensayos requeridos de acuerdo al artículo 450-13- Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico) del Instituto Nacional de Vías, para caracterización de las propiedades de los agregados.

Los ensayos realizados mostraron características favorables, muy parecidas y en algunos casos superiores al del agregado natural. Así, entre otros resultados, se puede destacar el buen comportamiento de la escoria EAF ante el ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles y la degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, cuyos valores están por debajo en 1.7 % y 3.9 % respecto del agregado natural (Grava) respectivamente. Estos ensayos pusieron de manifiesto la dureza del material, propiedad que resulta fundamental en un agregado para carreteras.

Para la escoria BOF, el resultado del ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles cumple con el requerimiento establecido, pero es superior en 0.3 % respecto del agregado natural y el resultado del ensayo de degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval es superior en 0.9 % respecto del agregado natural y superior en 0.7 % respecto al requerimiento máximo exigido en la norma para un nivel de tránsito NT-3. Lo anterior indica que la escoria BOF es más susceptible a la abrasión y molienda en presencia de agua. Los demás requerimientos establecidos están dentro del rango estipulado en la norma. Teniendo en cuenta lo anterior y a que el resultado de degradación por abrasión de la escoria BOF no está tan alejado del máximo requerido, se continuó utilizando este material en la investigación.

En cuanto al polvo de alto horno (BFD), los resultados de los ensayos realizados mostraron también características favorables en comparación con el agregado natural (Arena). Entre otros resultados, se puede evidenciar que BFD es un material no plástico y que el ensayo de equivalente de arena resultó superior en 25.8 % respecto del agregado natural. Los demás requerimientos establecidos están dentro del rango estipulado en la norma. Por otra parte, la procedencia industrial de los residuos (escoria EAF, escoria BOF y BFD) hace que su composición sea homogénea y carente de impurezas.

En cuanto a las características propias de las escorias, cabe destacar la alta densidad de la escoria EAF y la similitud de la densidad de la escoria BOF en comparación con el agregado natural. En cuanto a la absorción, la escoria BOF presenta más alta absorción que la escoria EAF y que el agregado natural, lo cual se ve reflejado en el aumento del porcentaje óptimo de cemento asfáltico en las mezclas con este material. El polvo de alto horno (BFD) presenta baja densidad en comparación con la arena utilizada en esta

investigación y la absorción es mucho mayor que la absorción de la arena, lo cual incrementa el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Tanto la escoria EAF como la escoria BOF se forman durante las operaciones básicas de fabricación de acero. Por lo tanto, las composiciones químicas y mineralógicas son similares. El óxido de calcio (CaO) y el óxido de hierro (Fe_2O_3) son los dos componentes químicos principales de las escorias EAF y BOF. Otro componente de las escorias EAF y BOF es el óxido de silicio (SiO_2). El óxido de fósforo (P_2O_5) está presente en la escoria BOF pero en la muestra de EAF analizada no está presente.

En la composición química de BFD el principal constituyente es Fe_2O_3 seguido por SiO_2 . En contraste con los agregados naturales, los componentes principales de la grava son el óxido de calcio (CaO) y el óxido de silicio (SiO_2), mientras que en la arena el componente principal es el óxido de silicio. De acuerdo al análisis realizado, los residuos de la industria siderúrgica utilizados en esta investigación no presentan compuestos peligrosos y de tenerlos el porcentaje de composición será muy bajo.

5.2.2 De acuerdo a esas propiedades y a la comparación con materiales granulares normalmente utilizados en capas estructurales para pavimentos ¿qué tipo de sustitución podría llevarse a cabo?

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades de la escoria EAF son favorables para su utilización en la fabricación de concretos asfálticos, de acuerdo a los resultados de los ensayos realizados, en algunos casos presentó mejores características que el agregado grueso natural (grava). Por lo cual, teniendo en cuenta las propiedades, es posible realizar la sustitución total del agregado convencional por este material alternativo.

Las propiedades de la escoria BOF, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de caracterización realizados, son muy similares a las propiedades del agregado grueso natural utilizado en esta investigación. Sin embargo, la degradación por abrasión es ligeramente superior al requerimiento establecido en las normas para capas de rodadura y para nivel de tránsito NT-3. A pesar de ello, se estudió la posibilidad de realizar la sustitución parcial y total del agregado natural, encontrando resultados aceptables en el comportamiento de los concretos asfálticos.

En cuanto al BFD, sustituto del agregado fino natural, las propiedades son convenientes para su utilización en concretos asfálticos. Si bien, presenta menor densidad y mayor absorción, es posible realizar la sustitución parcial y total del agregado fino convencionalmente utilizado.

5.2.3 ¿Qué cambios en el impacto ambiental se podrían generar con la utilización de estos residuos y la sustitución de agregados naturales?

La fabricación de acero tiene una variedad de efectos en el medio ambiente. Los principales impactos provienen de la utilización de energía y las materias primas, la

generación de residuos como las escorias, polvos y lodos también están generando afectación al medio ambiente ya que algunos tienen poco uso y es evidente su almacenamiento en patios de acopio. Con la utilización de residuos siderúrgicos BOF, EAF y BFD en la fabricación de concretos asfálticos para pavimentos se producirá un impacto positivo ya que disminuirá la acumulación de estos materiales.

Entre los daños ambientales, generados por la explotación de recursos naturales no renovables como materiales de construcción, cabe mencionar la deforestación propia en los procesos de explotación, pérdida en la biodiversidad y la alteración de los ecosistemas, daños en acuíferos y ríos que afectan inmediatamente a la población que depende de esta para cubrir sus necesidades básicas, etc. Sin embargo, la principal afectación es el consumo indiscriminado de materiales que son no renovables como la grava y arena. Con la utilización de residuos siderúrgicos BOF, EAF y BFD, se disminuye la explotación de materiales no renovables como la grava y arena, con consecuencias positivas que esto acarrea en el ecosistema. Aunque la producción de residuos siderúrgicos BOF, EAF y BFD en la región (Boyacá) es bastante inferior a la explotación y producción de materiales para construcción (grava y arena), la reducción en el consumo de material tipo grava sería de 28.6% y la reducción en el consumo de material tipo arena sería de 4%.

5.3 METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL DISEÑO DE LAS MEZCLAS

Ramcodes es una metodología de gran utilidad para el diseño, producción y control de calidad de concretos asfálticos, puesto que garantiza el cumplimiento de los parámetros volumétricos exigidos por las especificaciones. Además, existen varios beneficios al utilizar esta metodología como ahorro de tiempo, recursos y dinero, gracias a que solo es necesario realizar un mínimo de tres briquetas en comparación con 15 briquetas de metodologías más conocidas como Marshall o Superpave.

Los análisis del polígono de vacíos de la metodología Ramcodes, correspondiente a cada una de las mezclas objeto de esta investigación, se desarrollaron de una manera precisa y obteniendo buenos resultados, ya que los contenidos de cemento asfáltico obtenidos estuvieron muy cerca de los adoptados en el diseño, teniendo en cuenta las indicaciones propias de la metodología.

5.4 DISEÑO EN LABORATORIO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CON LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS SIDERÚRGICOS

Una vez verificada la aptitud de los residuos para poder ser utilizados en la fabricación de concretos asfálticos, se procedió al diseño de estos en laboratorio. Para ello, se estudiaron diez fórmulas de trabajo en las que se realizaba la sustitución parcial (50%) y total (100%) de los agregados naturales por los residuos siderúrgicos y una fórmula de trabajo con materiales convencionales. La fase de diseño se llevó a cabo con base en los ensayos para establecer las propiedades volumétricas, propiedades mecánicas y propiedades de desempeño. Los resultados obtenidos en dichos ensayos cumplen con las especificaciones establecidas por la normatividad, poniendo de manifiesto la posibilidad de utilizar concretos asfálticos fabricados con residuos de la industria siderúrgica para

construcción de capas de rodadura en carreteras.

5.4.1 Concretos asfálticos con escoria BOF y BFD. La mayor absorción presentada por la escoria BOF y el BFD frente a los agregados naturales, muestran la necesidad de aumentar la cantidad de cemento asfáltico para garantizar una envoltura de los agregados y asegurar un buen comportamiento de la mezcla. El contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla M-2, en la cual se sustituyó parcialmente los agregados naturales, aumento 1.7 % respecto de la mezcla base (M.1). El contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla M-3, en la cual se sustituyó totalmente los agregados naturales, aumento 2.1 % respecto de la mezcla base. Y el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla M-3 aumento 0.4 % respecto a la mezcla M-2.

A medida que se incrementa el contenido de escoria BOF y BFD en la mezcla, disminuye la gravedad específica bulk (G_{mb}) de la mezcla. Lo cual es evidente debido a la disminución de la densidad de BFD respecto a la densidad de la arena.

La disminución en los valores de estabilidad y el aumento en los valores de flujo pueden ser debidos al mayor contenido de cemento asfáltico. El valor de estabilidad de la mezcla M-2 disminuyó 11 % y el de la mezcla M-3 disminuyó 13 % respecto de la estabilidad de la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M-3 disminuyó 1.5 % respecto de la mezcla M-2. No obstante, los valores de estabilidad de las mezclas M-2 y M-3 son superiores en 17 % y 15 % respecto al valor mínimo requerido. Los valores de flujo, aunque presentaron un aumento respecto al flujo de la mezcla base, están dentro del rango establecido en el requerimiento. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, la escoria BOF por su textura superficial con bordes menos angulares y más redondeados que la textura de la grava, tiene incidencia en el valor de la estabilidad en las mezclas elaboradas con este material.

La tabla 45, presenta una comparación de las tendencias de las demás propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas respecto a la mezcla base.

Tabla 45. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de escoria BOF y BFD utilizado

ID mezcla	Propiedad					
	Residuos	Va	VAM	VFA	E/f	P ₂₀₀ /P _{be}
M-2	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Igual	Disminuye	Igual
M-3	+ Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Disminuye

Fuente: El autor

Por su parte, el ensayo para medir la susceptibilidad a la humedad mostró que a medida que se aumenta la cantidad de escoria BOF y BFD en la mezcla, los valores de resistencia a la tensión indirecta disminuyen respecto a los valores de resistencia de la mezcla base, tanto para las probetas ensayadas en seco como en las probetas acondicionadas. La mayor disminución de la resistencia se hace cuando se sustituye totalmente los agregados naturales, este hecho es debido a que el agregado natural proporciona mayor resistencia en la mezcla y tiene mayor resistencia que la escoria BOF. Por su parte, la disminución

en el comportamiento ante la acción del agua de las mezclas a medida que aumenta el contenido de escoria BOF y BFD, puede ser debido a la poca resistencia de la escoria BOF y a la poca adhesividad entre la BOF y el cemento asfáltico. A pesar de la disminución en la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas M-2 y M-3, en la mezcla M-2 la relación de la resistencia entre los especímenes acondicionados y no acondicionados (RRT) cumple con el requerimiento ($RRT_{M-2} = 81\%$) y en la mezcla M-3 aunque esta relación no cumple, si está muy cerca del mínimo requerido ($RRT_{M-3} = 79\%$).

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la deformación plástica mostraron que a mayor cantidad de escoria BOF y BFD incorporados en la mezcla, menores son las deformaciones finales producidas. Lo anterior puede ser debido a la interacción entre el cemento asfáltico y el BFD a causa de la textura rugosa y porosa presentes en este material. La deformación final en la mezcla M-2 es menor en 33% y en la mezcla M-3 es menor en 30% en relación con la deformación final de la mezcla base. Además, las velocidades de deformación obtenidas en el intervalo 105 a 120 minutos en las mezclas con BFD y escoria BOF son iguales a la velocidad obtenida para el mismo intervalo en la mezcla base. Las tres mezclas cumplen con los valores exigidos para un nivel de tránsito NT-3 y para temperatura media anual del aire superior e inferior a 24 °C, demostrando la aptitud de las mezclas para poder ser utilizadas en la construcción de capas de rodadura para estructuras de pavimento.

En cuanto al módulo resiliente obtenido en estas mezclas, son notoriamente menores al módulo resiliente obtenido en la mezcla base. El menor módulo resiliente obtenido en las mezclas ensayadas fue el de la mezcla M-3, este valor es menor en 60.3% respecto del módulo resiliente de la mezcla base. Lo cual puede ser debido al incremento en el contenido óptimo de cemento asfáltico y a la presencia de escoria BOF como agregado grueso teniendo en cuenta su textura superficial. En comparación, el módulo resiliente de la mezcla M-2 es inferior un 26% respecto al módulo resiliente de la mezcla base. Lo anterior puede ser debido a la combinación de agregado natural y alternativo, con lo cual la incidencia del aumento en el contenido óptimo de cemento asfáltico no es tan notoria. En ambos casos, la disminución en el valor del módulo resiliente, a una temperatura de la mezcla de 20 °C, repercute en el dimensionamiento de la estructura de pavimento. Esta incidencia se evidencia con el incremento del espesor de la capa asfáltica para el cumplimiento los requerimientos de diseño.

Por otro lado, la mezcla M-3 presenta mejor vida a fatiga a bajas deformaciones que la mezcla base. A medida que aumentamos el nivel de deformación, es decir, a deformaciones altas esta mezcla presenta menor vida a fatiga. De igual forma, teniendo en cuenta el número de ciclos de carga la mezcla M-3 resistirá mayores deformaciones iniciales. Lo anterior puede ser debido al aumento en el contenido óptimo de cemento asfáltico teniendo en cuenta su propiedad elástica. La mezcla M-2 presenta menor vida a fatiga a bajas deformaciones en comparación con la mezcla M-3 y la mezcla base, a altas deformaciones la mezcla M-2 presenta menor vida a fatiga que la mezcla base y un poco mayor que la mezcla M-3. Analizando la mezcla M-2 y teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, esta resistirá menores deformaciones iniciales que la mezcla base y mucho menores respecto a la mezcla M-3.

De las dos mezclas estudiadas en esta sección (M-2 y M-3) y teniendo en cuenta los resultados de los ensayos para determinar las características mecánicas y de desempeño, la que ofrece mejores condiciones técnicas para su implementación en la construcción de estructuras de pavimento, es la mezcla en la cual se sustituyó parcialmente los agregados naturales por escoria BOF y BFD (M-2).

5.4.2 Concretos asfálticos con escoria EAF y BFD. En estas mezclas el contenido óptimo de cemento asfáltico no es muy superior al contenido óptimo en la mezcla base. El contenido óptimo de la mezcla M-4, en la cual se sustituyó parcialmente los agregados naturales por escoria EAF y BFD, fue de 4.8 %. Y el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla M-5, en la cual se sustituyó totalmente los agregados naturales, aumento 0.5 % respecto de la mezcla base de la mezcla M-4. Lo anterior puede ser asociado a la textura de la escoria EAF, esta presenta una textura superficial áspera sin poros, mientras que la escoria BOF si presenta porosidad superficial. En consecuencia, la escoria EAF no absorbe tanto cemento asfáltico como la escoria BOF, ratificado en el ensayo de absorción realizado a los materiales.

A medida que se incrementa el contenido de escoria EAF y BFD en la mezcla, aumenta la gravedad específica bulk de la mezcla. Lo cual se puede relacionar a la mayor densidad de la escoria EAF respecto a la densidad de la grava. Aunque la densidad de BFD es menor a la densidad de la arena, esta no es representativa respecto a la diferencia de densidades de los agregados gruesos utilizados.

Los valores de estabilidad y flujo en estas mezclas no presentaron variaciones significativas respecto a la estabilidad y flujo de la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M-4 aumentó 2.4 % y el de la mezcla M-5 disminuyó 4.2 % respecto al valor de la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M-5 disminuyó 6.5 % respecto de la mezcla M-4. Sin embargo, los valores de estabilidad de las mezclas M-4 y M-5 son superiores en 36.2 % y 27.4 % respecto al valor mínimo requerido. Los valores de flujo, pese a que presentaron un incremento respecto al flujo de la mezcla base, estos valores cumplen el requerimiento establecido. De acuerdo a estos resultados, la escoria EAF presenta una textura superficial similar a la grava, lo cual garantiza una buena fricción y cohesión, lo cual incide en el valor de la estabilidad.

La tabla 46 muestra una comparación de las tendencias de las demás propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas en relación a la mezcla base y al aumento de residuo utilizado.

Tabla 46. Tendencias de las propiedades respecto al aumento escoria EAF y BFD utilizado

ID mezcla	Propiedad					
	Residuos	Va	VAM	VFA	E/f	P ₂₀₀ /P _{be}
M-4	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Igual
M-5	+ Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Aumenta

Fuente: El autor

En cuanto al desempeño de las mezclas, el ensayo para medir la susceptibilidad a la humedad mostró que a medida que se aumenta la cantidad de escoria EAF y BFD en la mezcla, los valores de resistencia a la tensión indirecta disminuyen, tanto para las probetas ensayadas en seco como en las probetas acondicionadas, respecto a los valores de resistencia de la mezcla base. Cabe resaltar que esta disminución no es tan considerable como en el caso de las mezclas M-2 y M-3. La mayor disminución de la resistencia se hace cuando se sustituye totalmente los agregados naturales, este hecho puede ser debido a la menor afinidad de la escoria EAF con el cemento asfáltico. Por su parte, la disminución en el comportamiento ante la acción del agua también puede ser atribuida a la afinidad del cemento asfáltico con la EAF. A pesar de la disminución en la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas M-4 y M-5, en la mezcla M-4 la relación de la resistencia entre los especímenes acondicionados y no acondicionados (RRT) cumple con el requerimiento ($RRT_{M-4} = 84\%$) y en la mezcla M-5 también se cumple el requerimiento ($RRT_{M-5} = 80\%$). De acuerdo con lo expresado anteriormente, se puede concluir que las mezclas elaboradas con escoria EAF y BFD son menos susceptibles al daño por humedad que las mezclas elaboradas con escoria BOF y BFD.

De otro modo, los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la deformación plástica mostraron que a mayor cantidad de escoria EAF y BFD incorporados en la mezcla, menores son las deformaciones finales producidas. Lo anterior puede ser debido a la interacción entre el cemento asfáltico y el BFD a causa de la textura rugosa y porosa presentes en este material. La deformación final en la mezcla M-4 es menor en 30 % y en la mezcla M-5 es menor en 39 % en relación con la deformación final de la mezcla base. Además, las velocidades de deformación obtenidas en el intervalo 105 a 120 minutos en la mezcla M-4 es igual a la velocidad obtenida para el mismo intervalo en la mezcla base, mientras que en la mezcla M-5 la velocidad de deformación en el mismo intervalo es menor. Las dos mezclas (M-4 y M-5) cumplen con los valores exigidos para un nivel de tránsito NT-3 y para temperatura media anual del aire superior e inferior a 24°C, demostrando también la aptitud de estas mezclas para poder ser utilizadas en la construcción de capas de rodadura para estructuras de pavimento.

En cuanto al módulo resiliente obtenido en las mezclas elaboradas con escoria EAF y BFD, son menores al módulo resiliente obtenido en la mezcla base. El menor módulo resiliente obtenido en las mezclas ensayadas fue el de la mezcla M-5, este valor es menor en 42.5 % respecto del módulo resiliente de la mezcla base, lo cual puede deberse al incremento en el contenido óptimo de cemento asfáltico y a la presencia de escoria EAF como agregado grueso, teniendo en cuenta su afinidad con el cemento asfáltico. En comparación, el módulo resiliente de la mezcla M-4 es inferior un 34.5 % respecto al módulo resiliente de la mezcla base, lo anterior puede deberse a la combinación de agregado natural y alternativo. En ambos casos, la disminución en el valor del módulo resiliente, a una temperatura de la mezcla de 20 °C, repercute en el dimensionamiento de la estructura de pavimento. Esta incidencia se evidencia con el incrementando del espesor de la capa asfáltica para el cumplimiento los requerimientos de diseño.

Por otra parte, la mezcla M-4 presenta mejor vida a fatiga a bajas deformaciones que la mezcla base. A medida que aumentamos el nivel de deformación, es decir, a deformaciones altas esta mezcla presenta menor vida a fatiga. De igual forma, teniendo en cuenta el número de ciclos de carga la mezcla M-4 resistirá mayores deformaciones

iniciales. La mezcla M-5 también presenta mayor vida a fatiga a bajas deformaciones en comparación con la mezcla base, a altas deformaciones la mezcla M-5 presenta menor vida a fatiga que la mezcla base y un poco menor que la mezcla M-4. Analizando la mezcla M-5 y teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, esta resistirá mayores deformaciones iniciales que la mezcla base y menores respecto a la mezcla M-4.

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos para determinar las características mecánicas y de desempeño, las mezclas M-4 y M-5 ofrecen condiciones técnicas apropiadas para su implementación en la construcción de estructuras de pavimento.

5.4.3 Concretos asfálticos con escoria EAF, escoria BOF y BFD. En la utilización de los tres materiales alternativos, el contenido óptimo de cemento asfáltico de la mezcla M-6, en el cual se sustituyó parcialmente los agregados naturales por escoria EAF, escoria BOF y BFD, aumentó 0.3 % con respecto al óptimo de cemento asfáltico de la mezcla base. En comparación, la mezcla M-7, en la cual se cambió el 100% de los agregados naturales por escoria EAF, escoria BOF y BFD, aumentó 1.3 % en relación con la mezcla base. El óptimo de cemento asfáltico de la mezcla M-7 aumentó 1.0 % respecto a la mezcla M-6. Lo anteriormente expuesto, puede obedecer a la menor proporción utilizada de escoria BOF en comparación de las mezclas M-2 y M-3, ya que la proporción de BFD ha permanecido casi constante en las mezclas anteriormente analizadas.

Así mismo, a medida que se incrementa el contenido de escoria EAF, escoria BOF y BFD en la mezcla, aumenta la gravedad específica bulk de la mezcla. Puesto que, la mayor densidad de la escoria EAF, en comparación con la densidad de escoria BOF y de la grava, contribuye con este aumento. Sin embargo, la densidad de BFD es menor a la densidad de la arena, esta diferencia no es significativa como en el caso de los agregados gruesos.

Los valores de estabilidad en las mezclas elaboradas con escoria BOF, escoria EAF y BFD son menores a los encontrados en la mezcla base. De igual modo, estos valores son menores a los valores de estabilidad de las mezclas M-4 y M-5 pero mayores a la estabilidad de las mezclas M-2 y M-3, lo cual puede ser debido a la presencia de la escoria BOF. El valor de estabilidad de la mezcla M-6 disminuyó 11 % y el de la mezcla M-7 disminuyó 9.4 % respecto de la estabilidad de la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M-6 es menor en 1.9 % en comparación con la mezcla M-7. No obstante, los valores de estabilidad de las mezclas M-6 y M-7 son superiores en 18.4 % y 20.4 % respecto al valor mínimo requerido. Los valores de flujo, aunque presentaron un aumento respecto al flujo de la mezcla base, están dentro del rango establecido en el requerimiento. La tabla 47 muestra una comparación de las tendencias de las demás propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas en relación a la mezcla base y al aumento de residuo utilizado.

Tabla 47. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de escoria BOF, escoria EAF y BFD utilizado

ID mezcla	Propiedad					
	Residuos	Va	VAM	VFA	E/f	P ₂₀₀ /P _{be}
M-6	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Igual
M-7	+ Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Disminuye	Igual

Fuente: El autor

Por su parte, el ensayo para medir la susceptibilidad al daño por humedad mostró que a medida que se aumenta la cantidad de escoria EAF, escoria BOF y BFD en la mezcla, los valores de resistencia a la tensión indirecta disminuyen, tanto para las probetas ensayadas en seco como en las probetas acondicionadas, respecto a los valores de resistencia de la mezcla base, lo cual puede ser atribuido al mayor contenido de cemento asfáltico y a la presencia de la escoria BOF. La resistencia a la tensión indirecta en las mezclas M-6 y M-7 son muy similares, sin encontrar una diferencia significativa por la sustitución total de los agregados naturales por los agregados alternativos. A pesar de la disminución en la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas M-6 y M-7, en la mezcla M-7 la relación de la resistencia entre los especímenes acondicionados y no acondicionados (RRT) cumple con el requerimiento ($RRT_{M-7} = 81 \%$) y en la mezcla M-6 aunque esta relación no cumple, si está muy cerca del mínimo requerido ($RRT_{M-3} = 79 \%$).

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la deformación plástica mostraron que a mayor cantidad de escoria EAF, escoria BOF y BFD incorporados en la mezcla, menores son las deformaciones finales producidas. Lo anterior puede ser debido a la interacción entre el cemento asfáltico y el BFD a causa de la textura rugosa y porosa presentes en este material y a la mayor afinidad del cemento asfáltico con la escoria BOF. Además, estas dos mezclas presentaron las menores deformaciones totales al final del ensayo. Las velocidades de deformación obtenidas en el intervalo 105 a 120 minutos en las mezclas con escoria EAF, BFD y escoria BOF son menores a la velocidad obtenida para el mismo intervalo en la mezcla base y son las menores velocidades de deformación de todas las mezclas ensayadas. Las dos mezclas (M-6 y M-7) cumplen con los valores exigidos para un nivel de tránsito NT-3 y para temperatura media anual del aire superior e inferior a 24°C , demostrando la aptitud de las mezclas para poder ser utilizadas en la construcción de capas de rodadura para estructuras de pavimento.

Los módulos resilientes de las mezclas elaboradas con escoria BOF, escoria EAF y BFD son menores al módulo resiliente de la mezcla base. Sin embargo, los valores de módulo resiliente de la mezcla en la cual se sustituyó parcialmente y la mezcla que se sustituyó totalmente el agregado natural, son muy similares. El módulo resiliente disminuyó en 26.1 % y 25.9 % en la mezcla M-6 y M-7 respectivamente, en comparación con el módulo resiliente de la mezcla base. Lo anterior, nos permite determinar que la combinación de todos los agregados, así como, la combinación de todos los agregados alternativos tiene la misma repercusión en el módulo resiliente. En ambos casos, la disminución en el valor del módulo resiliente, a una temperatura de la mezcla de 20°C , influye en el dimensionamiento de la estructura de pavimento. Esta incidencia se ve reflejada en el incremento del espesor de la capa asfáltica para el cumplimiento los requerimientos de diseño. Por último, la vida a fatiga de las mezclas M-6 y M-7 tienen similar comportamiento. Teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, estas mezclas resistirán similares deformaciones iniciales. A bajas deformaciones las mezclas M-6 y M-7 presentan mejor vida a fatiga que la mezcla base y a medida que aumentamos la deformación, presentan menor vida a fatiga.

La mezcla M-6 y M-7 ofrecen condiciones técnicas apropiadas para su implementación en la construcción de estructuras de pavimento. Lo anterior, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos para determinar las características mecánicas y de desempeño.

5.4.4 Concretos asfálticos con escoria EAF. En estas mezclas solo se sustituyó parcial y totalmente el agregado grueso por escoria EAF, como agregado fino en todos los casos se utilizó el agregado natural. Como la textura superficial de la escoria EAF es áspera con bordes subangulares y redondeada pero no presenta porosidad, el contenido óptimo de cemento asfáltico en estas mezclas es similar al contenido óptimo de la mezcla base. La mezcla M-8, en la cual se sustituyó parcialmente el agregado grueso natural por escoria EAF, aumentó solo en 0.1 % el contenido óptimo de cemento asfáltico en comparación con la mezcla base. Por otra parte, la mezcla M-9, en la cual se utilizó 100% escoria EAF como agregado grueso, disminuyó en 0.3 % el contenido óptimo de cemento asfáltico en comparación con la mezcla base. Lo expuesto anteriormente tiene sustento en la textura superficial y a la menor absorción de la escoria EAF.

Así mismo, a medida que se incrementa el contenido de escoria EAF en la mezcla aumenta su gravedad específica bulk, la mayor densidad de la escoria EAF en comparación con la densidad de la grava contribuye con este aumento.

En el caso de la estabilidad, el valor de estabilidad para la mezcla M-8 disminuyó solo un 2.3 % en relación a la mezcla base. El valor de estabilidad de la mezcla M-9 aumentó 2.8 % en comparación con la mezcla base. De todos modos, los valores de estabilidad de las mezclas M-8 y M-9 son superiores en 29.8 % y 36.7 % respectivamente respecto a la estabilidad mínima requerida.

Por el contrario, los valores de flujo para las mezclas M-8 y M-9 son los menores en comparación con todas las mezclas estudiadas en esta investigación, aunque estos valores están dentro del intervalo establecido en el requerimiento. Teniendo en cuenta que la estabilidad de una mezcla depende de la fricción entre partículas, lo cual está relacionado con la forma, textura superficial y la cohesión del cemento asfáltico, la escoria EAF presenta una buena textura superficial y una buena cohesión con el cemento asfáltico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas del agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla.

La tabla 48 muestra una comparación de las tendencias de las demás propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas en relación a la mezcla base y al aumento de residuo utilizado.

Tabla 48. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de escoria EAF utilizado

ID mezcla	Propiedad					
	Residuos	Va	VAM	VFA	E/f	P ₂₀₀ /P _{be}
M-8	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Igual
M-9	+ Aumenta	Igual	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta

Fuente: El autor

Por su parte, el ensayo para medir la susceptibilidad al daño por humedad mostró que a medida que se aumenta la cantidad de escoria EAF en la mezcla, los valores de resistencia a la tensión indirecta aumentan, tanto para las probetas ensayadas en seco como en las probetas acondicionadas. La resistencia a la tensión indirecta de la mezcla M-9 es mayor a la resistencia a la tensión indirecta de la mezcla M-8, tanto en las probetas

acondicionadas como sin acondicionar. Respecto a los valores de resistencia de la mezcla base estos valores son menores. A pesar de la disminución en la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas M-8 y M-9 respecto a la mezcla base, la relación de la resistencia entre los especímenes acondicionados y no acondicionados (RRT) cumplen con el requerimiento ($RRT_{M-8} = 85\%$ y $RRT_{M-9} = 80\%$). Por esta razón, las mezclas elaboradas con escoria EAF como agregado grueso cumplen los requerimientos y el daño por humedad está relacionado con pérdida de adhesividad entre el cemento asfáltico y los agregados.

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la deformación plástica mostraron que a mayor cantidad de escoria EAF incorporada en la mezcla, mayores son las deformaciones finales producidas. Lo anterior puede ser debido a la menor afinidad entre el cemento asfáltico y la escoria EAF. Además, estas dos mezclas presentaron las mayores deformaciones totales al final del ensayo, en la mezcla M-8 se presentó un incremento del 9.0 % y la mezcla M-9 un incremento de 15.0 % en comparación con la deformación total de la mezcla base. Las velocidades de deformación obtenidas en el intervalo 105 a 120 minutos en las mezclas con escoria EAF son iguales a la velocidad obtenida para el mismo intervalo en la mezcla base. Las mezclas M-8 y M-9 cumplen con los valores exigidos de velocidad de deformación para un nivel de tránsito NT-3 y para temperatura media anual del aire superior e inferior a 24 °C, demostrando la aptitud de las mezclas para poder ser utilizadas en la construcción de capas de rodadura para estructuras de pavimento.

Los módulos resilientes de estas mezclas son menores al módulo resiliente de la mezcla base. Sin embargo, los valores de módulo resiliente de la mezcla en la cual se sustituyó parcialmente y la mezcla que se sustituyó totalmente el agregado natural, son muy similares. El módulo resiliente disminuyó en 8.5 % y 5.8 % en la mezcla M-8 y M-9 respectivamente, en comparación con el módulo resiliente de la mezcla base. Lo anterior, permite determinar que la utilización de escoria EAF como agregado grueso tiene el mismo efecto que el agregado natural en el módulo resiliente.

Adicionalmente, la mezcla M-8 presenta mejor vida a fatiga a bajas deformaciones que la mezcla base. A medida que aumentamos el nivel de deformación, es decir, a deformaciones altas esta mezcla presenta menor vida a fatiga. De igual forma, teniendo en cuenta el número de ciclos de carga la mezcla M-8 resistirá mayores deformaciones iniciales. La mezcla M-9 presenta mayor vida a fatiga a bajas deformaciones en comparación con la mezcla M-8 y la mezcla base, a altas deformaciones la mezcla M-9 presenta menor vida a fatiga que la mezcla base y un poco mayor que la mezcla M-8. Analizando la mezcla M-9 y teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, esta resistirá iguales deformaciones iniciales que la mezcla base y menores respecto a la mezcla M-8.

Las mezclas fabricadas con escoria EAF como agregado grueso ofrecen condiciones técnicas apropiadas para su implementación en la construcción de estructuras de pavimento. Lo anterior, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos para determinar las características mecánicas y de desempeño.

5.4.5 Concretos asfálticos con BFD. En estas mezclas solo se sustituyó parcial y

totalmente el agregado fino por BFD, como agregado grueso en todos los casos se utilizó el agregado natural. Como la textura superficial del BFD es porosa, el contenido óptimo de cemento asfáltico en estas mezclas es mayor al contenido óptimo de la mezcla base. La mezcla M-10, en la cual se sustituyó parcialmente el agregado fino natural por BFD, aumentó solo en 1.1 % en comparación con el contenido óptimo de la mezcla base. De igual forma, la mezcla M-11, en la cual se utilizó 100 % BFD como agregado fino, aumentó en 1.5 % el contenido óptimo de cemento asfáltico. Los resultados anteriores tienen sustento en la textura superficial y a la mayor absorción del BFD en comparación con la absorción de la arena.

Así mismo, a medida que se incrementa el contenido de BFD en la mezcla, disminuye la gravedad específica bulk de la mezcla. Puesto que, la menor densidad del BFD en comparación con la densidad de la arena, contribuye con esta disminución.

En el caso de la estabilidad, para las mezclas con BFD se encontraron los valores más bajos. El valor de estabilidad de la mezcla M-10 disminuyó 17 % y el de la mezcla M-11 un 20 % en comparación con la mezcla base. De todos modos, los valores de estabilidad de las mezclas M-10 y M-11 son superiores en 10.3 % y 6.1 % respectivamente respecto a la estabilidad mínima requerida.

En forma similar, los valores de flujo en mezclas con BFD son menores que el valor de flujo en la mezcla base y están dentro del intervalo establecido en el requerimiento. Teniendo en cuenta que la estabilidad de una mezcla depende de la fricción entre partículas, lo cual está relacionado con la forma, textura superficial y la cohesión del cemento asfáltico y debido a que se utilizó agregado grueso natural, la disminución en la estabilidad puede estar relacionada con el aumento en el contenido óptimo de cemento asfáltico.

La tabla 49 muestra una comparación de las tendencias de las demás propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas M-10 y M-11 en relación a la mezcla base y al aumento de residuo utilizado.

Tabla 49. Tendencias de las propiedades respecto al aumento de residuo utilizado

ID mezcla	Propiedad					
	Residuos	Va	VAM	VFA	E/f	P ₂₀₀ /P _{be}
M-10	Aumenta	Disminuye	Aumenta	Aumenta	disminuye	Igual
M-11	+ Aumenta	aumenta	Aumenta	Aumenta	disminuye	igual

Fuente: El autor

El ensayo para medir la susceptibilidad al daño por humedad mostró que a medida que se aumenta la cantidad de BFD en la mezcla, los valores de resistencia a la tensión indirecta disminuyen, tanto para las probetas ensayadas en seco como en las probetas acondicionadas. La resistencia a la tensión indirecta de la mezcla M-10 es mayor a la resistencia a la tensión indirecta de la mezcla M-11, tanto en las probetas acondicionadas como sin acondicionar. Lo actual puede ser debido a la mayor cantidad de asfalto.

Respecto a los valores de resistencia de la mezcla base estos valores son menores. A pesar

de la disminución en la resistencia a la tensión indirecta de las mezclas M-10 y M-11, la relación de la resistencia entre los especímenes acondicionados y no acondicionados (RRT) cumplen con el requerimiento ($RRT_{M-10} = 84\%$ y $RRT_{M-9} = 81\%$). Por esta razón, las mezclas elaboradas con BFD como agregado fino cumplen los requerimientos y no se evidencia mayor daño por efecto del agua.

Los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la deformación plástica mostraron que a mayor cantidad de BFD incorporada en la mezcla, mayores son las deformaciones finales producidas. Lo anterior puede ser debido a la mayor cantidad de cemento asfáltico obtenido en la fórmula de trabajo. Además, estas dos mezclas presentaron menores deformaciones totales al final del ensayo en comparación con la mezcla base. En la mezcla M-10 se presentó una disminución en la deformación total del 24.2 % y la mezcla M-11 una disminución de 18.2 % en comparación con la deformación total de la mezcla base. Las velocidades de deformación obtenidas en el intervalo 105 a 120 minutos en las mezclas con BFD son iguales a la velocidad obtenida para el mismo intervalo en la mezcla base, las mezclas cumplen con los valores exigidos de velocidad de deformación para un nivel de tránsito NT-3 y temperatura media anual del aire superior e inferior a 24 °C, demostrando la aptitud de las mezclas para poder ser utilizadas en la construcción de capas de rodadura para estructuras de pavimento.

Los módulos resilientes de las mezclas con BFD son menores al módulo resiliente de la mezcla base. Además, el módulo resiliente de la mezcla en la cual se sustituyó totalmente el agregado fino natural por BFD (M-11) es inferior a la mezcla en la cual se sustituyó parcialmente el agregado natural (M-10). El módulo resiliente disminuyó en 21.4 % y 50.7 % en la mezcla M-10 y M-11 respectivamente, en comparación con el módulo resiliente de la mezcla base. De igual forma, el valor del módulo resiliente de la mezcla M-11 presentó una disminución de 37.3 % respecto de la mezcla M-10. Estos valores de módulo resiliente tendrán incidencia en el diseño estructural del pavimento, aumentando el espesor de la carpeta asfáltica utilizada como capa de rodadura.

Adicionalmente, la mezcla M-10 presenta mejor vida a fatiga a bajas deformaciones que la mezcla base. A medida que aumentamos el nivel de deformación, es decir, a deformaciones altas esta mezcla presenta menor vida a fatiga. De igual forma, teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, la mezcla M-10 resistirá mayores deformaciones iniciales. La mezcla M-11 presenta menor vida a fatiga a bajas deformaciones en comparación con la mezcla M-10 y la mezcla base, a altas deformaciones la mezcla M-11 presenta mejor vida a fatiga que la mezcla M-10 y un poco menor que la mezcla base. Analizando la mezcla M-11 y teniendo en cuenta el número de ciclos de carga, esta resistirá menores deformaciones iniciales que la mezcla base y menores respecto a la mezcla M-10.

De las dos mezclas estudiadas (M-10 y M-11) y teniendo en cuenta los resultados de los ensayos para determinar las características mecánicas y de desempeño, la que ofrece mejores condiciones técnicas para su implementación en la construcción de estructuras de pavimento, es la mezcla en la cual se sustituyó parcialmente el agregado fino por BFD (M-10).

5.5 ESTUDIO REOLÓGICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON EAFD

El objeto de este análisis fue investigar las propiedades reológicas del cemento asfáltico modificado con polvo de escoria de horno de arco eléctrico (EAFD). En relación con los resultados de los ensayos se puede concluir.

La incorporación de EAFD tiene incidencia en la consistencia del cemento asfáltico. La disminución gradual de la penetración y el aumento en el punto de ablandamiento a medida que se aumentaba el porcentaje de EAFD así lo demuestra. La pérdida de masa después del ensayo RTFO también se redujo con la adición de EAFD. Todas estas observaciones se relacionan con una mejora en las características del cemento asfáltico.

Como resultado de la prueba DSR en los asfaltos iniciales (sin envejecer), el valor de G^* disminuye a medida que se aumenta la temperatura. A medida que se aumenta la cantidad de EAFD el valor de G^* aumenta. Del mismo modo, el valor del ángulo fase δ aumenta con el incremento de la temperatura, por lo cual, el cemento asfáltico pierde parte de la elasticidad y aumenta la porción del componente viscoso. A medida que se aumenta la cantidad de EAFD el valor de δ permanece casi constante. En consecuencia, el valor de $G^*/\text{sen}\delta$ aumenta en el cemento asfáltico modificado con 10 % de EAFD, indicando que este es lo suficientemente rígido y elástico para soportar el ahuellamiento.

En los cementos asfálticos envejecidos a corto plazo (RTFO), G^* disminuye y δ aumenta con el incremento de la temperatura. En contraste, G^* aumenta y δ disminuye con el aumento de EAFD. La disminución en el ángulo fase indica la recuperación del componente elástico del cemento asfáltico. En definitiva, los valores de $G^*/\text{sen}\delta$ aumentan cuando el cemento asfáltico se modifica con EAFD.

De igual modo, en los cementos asfálticos envejecidos a largo plazo (RTFO+PAV) G^* disminuye y δ aumenta con el incremento de la temperatura. Con la adición de EAFD G^* aumenta y δ disminuye. Por lo tanto, el valor de $G^*/\text{sen}\delta$ aumenta a medida que aumentamos la cantidad de EAFD. Es por esto, que el cemento asfáltico se vuelve rígido y pierde componente elástico, lo cual no es recomendable por que será susceptible al agrietamiento por fatiga.

En el ensayo de recuperación elástica a diferentes esfuerzos (MSCR) y teniendo en cuenta las especificaciones de la AASHTO, la modificación del cemento asfáltico con polvo de escoria de horno de arco eléctrico es favorable, puesto que se puede utilizar para la elaboración de concretos asfálticos cuyos niveles de tránsito son más altos. Además, el porcentaje de recuperación R en el ensayo MSCR presenta un aumento con la adición de EAFD, es decir un aumento en el comportamiento elástico. De igual forma, la proporción de deformación no recuperada J_{nr} muestra disminución en los asfaltos modificados.

5.6 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA FABRICACIÓN DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CON RESIDUOS SIDERÚRGICOS

Para poder tener argumentos y validar la posibilidad de empleo de las mezclas diseñadas,

se llevó a cabo un análisis económico sobre los costos de fabricación en planta de cada una de las mezclas, para lo cual se tuvo en cuenta el costo de adquisición en el sitio de producción de cada uno de los materiales, el costo de acarreo hasta la ciudad de Tunja en donde está la planta y demás costos fijos en la fabricación de las mezclas. Adicionalmente, con los datos obtenidos se realizó un diseño estructural con la metodología AASHTO, y con estos resultados se simuló la construcción de un tramo de carretera y se calculó el valor de adquisición de la cantidad requerida de cada mezcla en planta para realizar la pavimentación del tramo.

En cuanto a los precios unitarios de la fabricación de las mezclas, se encontró que las mezclas M-2 y M-3 tienen un precio unitario mayor que el precio unitario de la mezcla base. Si bien, se presentó una reducción en el valor de los agregados con la utilización de escoria BOF y BFD, no se ve reflejado en el precio unitario debido al incremento en el valor del cemento asfáltico y los costos de acarreo asociados. El precio unitario de la mezcla M-2 es superior en 9.6 % y la mezcla M-3 en 10.1 % en comparación con el precio unitario de la mezcla base.

El precio unitario de la mezcla M-4 es menor un 5.2 % en relación con la mezcla base. Por el contrario, la mezcla M-5 presentó un precio unitario mayor en 2.6 %. En el caso de la mezcla M-4 este menor precio está relacionado a que no se presentó incremento en el contenido óptimo de cemento asfáltico y al menor valor de los agregados alternativos. En la mezcla M-5 si se presentó un aumento en el contenido óptimo de cemento asfáltico el cual repercutió en el precio unitario final pese a la reducción en los precios de adquisición de la escoria EAF y BFD.

De la misma forma, el precio unitario de la mezcla M-6 es menor un 6.0 % y el de la mezcla M-7 es mayor en un 3.2 % en comparación con el precio unitario de la mezcla base. Teniendo en cuenta que estas mezclas están elaboradas con los tres materiales alternativos, la incidencia de las características de estos materiales en el precio está dada por el incremento en el contenido de cemento asfáltico. En el caso de la mezcla M-6 al tener menos proporción de estos materiales, el incremento en el contenido de cemento asfáltico es mínimo y el menor valor de adquisición de la escoria EAF, escoria BOF y BFD, con todo lo anterior se consiguió un menor precio unitario. No obstante, en la mezcla M-7 si se presentó un aumento considerable en el contenido óptimo de cemento asfáltico.

Considerando el caso de las mezclas M-8 y M-9, en estas mezclas solo se utilizó escoria EAF como material alternativo. Por lo cual, el contenido óptimo de cemento asfáltico no tuvo incremento en relación con la mezcla base, además, el valor de adquisición de la escoria EAF es menor al del agregado natural. Teniendo en cuenta lo anterior, el precio unitario de estas mezclas es menor al precio unitario de la mezcla base. El precio unitario de la mezcla M-8 es menor en 6.6 % y el de la mezcla M-9 es menor en 12.8 %. Estas dos mezclas tienen los menores precios unitarios, en comparación con todas las mezclas analizadas en este estudio.

En relación con las mezclas M-10 y M-11, el precio unitario aumentó en relación con el costo de la mezcla base, el incremento en el costo en la mezcla M-10 fue de 3.8 %, mientras que en la mezcla M-11 fue de 6.9 %. Es posible que este incremento esté

relacionado con el incremento del contenido óptimo de cemento asfáltico. Conviene subrayar, que en estas mezclas solo se substituyó el agregado fino natural por BFD.

En relación con el costo de adquisición de las mezclas para realizar el trabajo de pavimentación de un kilómetro de vía, este depende del espesor obtenido en el diseño. Para este análisis se tuvo en cuenta el costo de adquisición de la mezcla en planta, dado que, los costos de transporte de la planta al sitio de la obra, maquinaria y personal para la ejecución de la obra son los mismos (no es necesario modificar la maquinaria para la instalación de las mezclas con residuos, lo cual ya de por sí supone una ventaja).

Los mayores espesores de diseño se obtuvieron con las mezclas M-3, M-4, M-5 y M-11, a causa de tener los menores módulos resilientes determinados en laboratorio. El espesor de diseño obtenido con las demás mezclas varía solo en un centímetro. En consecuencia, la mezcla M-3 presentó el costo más elevado, en comparación con la mezcla base en 68.8 %, seguida de la mezcla M-11 con 42.6 % más que la mezcla base, luego la mezcla M-5 con 29.9 %, después la mezcla M-2 con 16.8 % y la mezcla M-4 con 13.8 %. En contraste con lo anterior, el costo de adquisición de las mezclas M-8 y M-9 es menor al costo de la mezcla base. El costo de la mezcla M-8 es menor en 6.5 % y la mezcla M-9 en 12.8 %. En las demás mezcla el costo de adquisición es superior al de la mezcla base, pero su variación no es superior al 10%

5.7 ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE LOS CONCRETOS ASFÁLTICOS CON RESIDUOS SIDERÚRGICOS

Como se obtuvo resultados en su mayoría satisfactorios de los diferentes ensayos de control realizados en laboratorio durante el proceso de fabricación, estos ensayos muestran que los residuos (escoria EAF, escoria BOF y BFD) no sufren ninguna alteración en sus propiedades durante el proceso de fabricación. Además, las características de las mezclas fabricadas ofrecen condiciones técnicas aceptables, esto valida la aptitud del proceso de fabricación.

Aunque algunas mezclas como la M-3, M-5 y M-11 presentaron inferiores características que la mezcla base, las demás mezclas analizadas dieron resultados satisfactorios muy semejantes a los de la mezcla base. Por lo cual, teniendo en cuenta el análisis económico y ambiental es aceptable la utilización de residuos siderúrgicos como materiales en la fabricación de concretos asfálticos para pavimentos.

5.8 CONCLUSIONES FINALES

Tras el análisis del conjunto de resultados obtenidos durante toda la investigación, como conclusiones principales podemos citar las siguientes:

Las propiedades mostradas por las escorias (BOF y EAF) y el polvo de alto horno durante los ensayos de caracterización los convierte en materiales apropiados para ser utilizados como sustitutos de áridos naturales en la fabricación de concretos asfálticos.

Las mezclas diseñadas en laboratorio con residuos siderúrgicos como sustitutos, totales o parciales, de agregados naturales cumplen con los requerimientos exigidos por el Instituto Nacional de Vías para nivel de tránsito NT-3 y por tanto son aptas para su utilización en concretos asfálticos para pavimentos.

El comportamiento durante la fabricación de las mezclas con residuos siderúrgicos en el laboratorio demuestra la viabilidad de su utilización. Para poder ratificar lo anterior se recomienda para futuras investigaciones realizar tramos de prueba y así evaluar el comportamiento directo de las mezclas bajo la incidencia del tránsito y condiciones reales.

BIBLIOGRAFÍA

A

- AASHTO. (1997). *Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixture Using Marshall Apparatus*.
- AASHTO. (2014). *AASHTO T-350-14 Standard Method of test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test of Asphalt Binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*.
- AASHTO, A. A. of S. H. and T. O. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington DC.
- Acosta, Y. O. (2018). Producción Escoria EAF en Diaco. In *Entrevista*. Tuta.
- Adams, W., & Mueller, H. (1982). The steel industry. *The Structure of American Industry*, 74–125.
- Adegoloye, G., Beaucour, A. L., Ortola, S., & Noumowe, A. (2016). Mineralogical composition of EAF slag and stabilised AOD slag aggregates and dimensional stability of slag aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 115, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.036>
- AENOR, A. E. de N. y certificación. (2012). *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez* (No. UNE-EN 12697-26). Madrid.
- Aguilar Moya, J. P. (2002). CARACTERIZACIÓN DEL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. *Construyendo Caminos/ Revista Especializada En Ingeniería de Pavimentos*, 54–56. Retrieved from www.construyendocaminos.pe
- Airey, G. D. (2003). State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165–176. <https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- Al-Khateeb, G. G., & Al-Akhras, N. M. (2011). Properties of Portland cement-modified asphalt binder using Superpave tests. *Construction and Building Materials*, 25(2), 926–932. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.091>
- Ameri, M., & Behnood, A. (2012). Laboratory studies to investigate the properties of CIR mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates. *Construction and Building Materials*, 26(1), 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.047>
- Ameri, M., Hesami, S., & Goli, H. (2013). Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building Materials*, 49, 611–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034>
- Amoussou, R. I. H. D. T., Tanoue, H., Sasaki, M., & Shigeishi, M. (2016). Hydrothermal recovery of asphalt from asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1196–1204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.129>
- Anderson, R. M. (2011). The Multiple-Stress Creep-Recovery (MSCR) test and Specification. Asphalt Institute.
- Anderson, R. M., Carpenter, S. H., Daniel, J. S., Prowell, B. D., Shen, S., Bhattacharjee, S., ... Maghsoodloo, S. (2010). *Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt*. <https://doi.org/10.17226/14360>
- Anderson, R. M., & McGennis, R. (1995). Superpave Asphalt Mixture Design Illustrated Level 1 Lab Methods. *Federal Highway Administration, FHWA-SA-95*(February), 1–94.
- Appiah, J. K., Berko-Boateng, V. N., & Tagbor, T. A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.001>
- Aranda, C., & Clavijo, C. (2014). Análisis del comportamiento físico-mecánico de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2 modificada con caucho y cuero 75% y 25% respectivamente. *Rumbo Red Universitaria Metropolitana de Bogotá*.

- Arribas, I., Santamaría, A., Ruiz, E., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2015). Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, *90*, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003>
- Asi, I. M. (2007). Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Building and Environment*, *42*(1), 325–329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.020>
- Asociación Mexicana del Asfalto AC. (2013). *Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013. Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño* (No. PA-MA 01). Retrieved from www.amaac.org.mx
- Asphalt Institute. (1992). *Principios de construcción de pavimentos de mezclas asfálticas en caliente "Serie de Manuales No 22 (MS-22S)*.
- Asphalt Institute. (1993). *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-mix Types. (Manual Series No. 2) MS-2*. Asphalt Institute: GTH edition.
- Asphalt Institute. (2001). *Superpave Mix Design Series No. 2 (SP-2)*. Asphalt Institute Research Center.
- Asphalt Institute. (2012). *Asphalt Binder Testing. Technician's Manual for Specification Testing of Asphalt Binder* (Third Edition No. MS-25).
- ASTM. (n.d.-a). *Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures*.
- ASTM. (n.d.-b). *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*.
- ASTM. (2001). *Standard practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water*.
- ASTM. (2003). ASTM D36. *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)* / This, 93(Reapproved), 1–3. <https://doi.org/10.1520/C0338-93R08.4.1>
- ASTM. (2004). ASTM D 2872-12e1. *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, (C), 1–6. <https://doi.org/10.1520/D2872>
- ASTM. (2005a). *Section 04-Construction: Volume 04.02 Concrete and Aggregates*. West Conshohocken, Pa.
- ASTM. (2005b). *Section 04-Construction: Volume 04.03 Road and Paving Materials*. West Conshohocken, Pa.
- ASTM. (2006). ASTM D 5 -97. “*Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*”. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.*, 6–8.
- ASTM. (2008). ASTM D6521-13. *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)* / *i*(April), 1–6. <https://doi.org/10.1520/D6521-08>. Copyright
- ASTM. (2015). *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. *Astm*, *4*. <https://doi.org/10.1520/D0008>
- ASTM D 4123. (1995). *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous*. *Annual Book of American Society for Testing Materials ASTM Standards*, *82*(Reapproved), 2–5. <https://doi.org/10.1520/D4123-82R95>
- Autelitano, F., & Giuliani, F. (2016). Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, *113*, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.054>
- Ayala, M. I. Y., & Anguas, P. G. (2016). Efecto de la Temperatura en la Evaluación de la Fatiga en Ligantes Asfálticos. *Revista Infraestructura Vial - LanammeUCR*, 5–13.
- Aziz, M. M. A., Hainin, M. R., Yaacob, H., Ali, Z., Chang, F.-L., & Adnan, A. M. (2014). Characterisation and utilisation of steel slag for the construction of roads and highways. *Materials Research Innovations*, *18*(sup6), S6-255-S6-259. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000967>

B

- Bansal, S., Kumar Misra, A., & Bajpai, P. (2017). Evaluation of modified bituminous concrete mix developed using rubber and plastic waste materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2017.07.009>
- Barreto Bernal, P. C., Gutiérrez Molina, O., & Lara Rodríguez, J. S. (2014). La reconversión industrial de la siderúrgica integrada en Colombia. *Estudios Gerenciales*, 30(133), 451–460. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.05.001>
- Belmonte Sánchez, A. F. (2009). *Análisis de la reutilización de residuos procedentes de la industria de Silestone en la fabricación de mezclas Bituminosas*. Universidad de Granada.
- Benedetto, H., Roche, C., Baaj, H., Pronk, a., & Lundström, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 37(3), 202–216. <https://doi.org/10.1007/BF02481620>
- Bhasin, A., Castelo Branco, V. T., Masad, E., & Little, D. N. (2009). Quantitative Comparison of Energy Methods to Characterize Fatigue in Asphalt Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(2), 83–92. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:2\(83\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:2(83))
- Bianchetto, H. D., Asurmendi, A. I., & Soengas, C. (2011). El “Grado de comportamiento funcional”(GCF) de los ligantes asfálticos. In *XVI CILA, Congrso Ibero-Latinoamericano de Asfalto* (pp. 1–12). Rio de Janeiro Brazil.
- Borges, C. & F. (2004). Estabilizacáo e viabilidade técnica da utilizacáo de escórias de aciaria eléctrica. *Ambiente Construido*, 4, 57–81.
- Brovelli, C., Crispino, M., Pais, J., & Pereira, P. (2015). Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.060>
- Bulei, C., Todor, M. P., Hebut, T., & Kiss, I. (2018). Directions for material recovery of used tires and their use in the production of new products intended for the industry of civil construction and pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294, 12064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012064>

C

- Capellán-Pérez, I., Arto, I., Polanco-Martínez, J. M., González-Eguino, M., & Neumann, M. B. (2016). Likelihood of climate change pathways under uncertainty on fossil fuel resource availability. *Energy Environ. Sci.*, 9(8), 2482–2496. <https://doi.org/10.1039/C6EE01008C>
- Caro, S., Diaz, A., Rojas, D., & Nuñez, H. (2014). A micromechanical model to evaluate the impact of air void content and connectivity in the oxidation of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 61, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.013>
- Carpenter, S., Ghuzlan, K., & Shen, S. (2003). Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832(October 2014), 131–138. <https://doi.org/10.3141/1832-16>
- Carpenter, S., & Shen, S. (2006). Dissipated Energy Approach to Study Hot-Mix Asphalt Healing in Fatigue. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1970(October), 178–185. <https://doi.org/10.3141/1970-21>
- Carvalho, S. Z., Vernilli, F., Almeida, B., Demarco, M., & Silva, S. N. (2017). The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(June), 216–220. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.021>
- Castro, W. A., Rondón, H. A., & Barrero Calixto, J. C. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Ingeniería, ISSN-E 0121-750X, Vol. 21, N°. 1, 2016, 21(1), 3*. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.1.a01>
- Chaves Palacios, J. (2004). Desarrollo Tecnológico En La Primera Revolución Industrial. *Norba. Revista de Historia*, 17, 213–375.
- Chen, J. S., & Wei, S. H. (2016). Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. *Construction and Building Materials*, 128, 148–153.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.027>

- Chen, Z., Wu, S., Wen, J., Zhao, M., Yi, M., & Wan, J. (2015). Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, *93*, 911–918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.070>
- Chen, Z., Xie, J., Xiao, Y., Chen, J., & Wu, S. (2014). Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder. *Construction and Building Materials*, *64*(July 2016), 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.074>
- Cong, P., Wang, J., Li, K., & Chen, S. (2012). Physical and rheological properties of asphalt binders containing various antiaging agents. *Fuel*, *97*, 678–684. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.028>
- Cuchi, A & Sangrera, A. (2007). Reutilización y reciclaje de los residuos del sector de la Construcción. *Ambienta*, 59–68.

D

- Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R., Biswal, S. K., Mohapatra, B. K., & Misra, V. N. (2002). Effective Utilization of Blast Furnace Flue Dust of Integrated Steel Plants, *2*(2), 61–68.
- Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S. R., & Misra, V. N. (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*, *50*(1), 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>
- Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas, P., Villatoro Mendez, G. M., & Rodríguez Oropeza, G. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica, (299), 99.
- Delgado Salazar, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano. *Metodos Y Materiales LanammeUCR*, *1*, 25–38.
- Delvasto, P., Ibanez Aldao, B., & Sandoval Ravotti, D. (2011). Characterization of Electric Arc Furnace Steel Dust Generated in Venezuela and Preliminary Assessment of Its Leachability With Diluted Organic Acids. *Dyna-Colombia*, *78*(169), 221–229.
- Diab, A., & You, Z. (2017). Small and large strain rheological characterizations of polymer- and crumb rubber-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, *144*, 168–177. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.175>
- Ding, Z., Zhu, M., Tam, V. W. Y., Yi, G., & Tran, C. N. N. (2018). A system dynamics-based environmental benefit assessment model of construction waste reduction management at the design and construction stages. *Journal of Cleaner Production*, *176*, 676–692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.101>
- Dougan, C. E., Stephens, J. E., Mahoney, J., & Hansen, G. (2003). Dynamic Modulus Test Protocol - Problems and Solutions. *FHWA Report*.
- Drobíková, K., Plachá, D., Motyka, O., Gabor, R., Kutlákova, K. M., Vallová, S., & Seidlerová, J. (2016). Recycling of blast furnace sludge by briquetting with starch binder: Waste gas from thermal treatment utilizable as a fuel. *Waste Management*, *48*, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.047>

E

- EAPA. (2016). Asphalt in figures 2015. *European Asphalt Pavement Association*, 1–9.
- Elizondo, F., Badilla, G., & Ulloa, Á. (2008). Predicción de módulos resilientes en mezclas asfálticas mediante el modelo de Witczak. *Revista Infraestructura Vial*, (19), 40–50.
- Elizondo Arrita, F., Salazar Delgado, J., & Villegas Villegas, E. (2013). Análisis Reológico De Asfaltos Modificados, 169–178.
- Eugene Avallone, Theodore Baumeister, A. S. (2006). Iron and steel 6.2. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 1–1800.

F

- Fakhri, M., & Ahmadi, A. (2017a). Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles. *Construction and Building Materials*, *157*, 748–756. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.116>
- Fakhri, M., & Ahmadi, A. (2017b). Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation. *Construction and Building Materials*, *147*, 630–638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117>
- Farigua, H. (2017). Proceso Acería. In *Entrevista* (p. Ingeniero Proceso Acería, Acerías Paz del Río S.A.).
- Fomento, M., Rural, M. medio ambiente y, & CEDEX. (2011). Ficha técnica escorias de horno de arco eléctrico. *Cedex*, *2.3*, 1–19. Retrieved from <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/22980D5E-377B-4697-AEFE-CE897A68963D/119858/ESCORIASDEACERIADEHORNODEARCOELECTRICO.pdf>
- Franco, E. G., González, H. F., & Hernández, D. a. (2010). Integrated production and distribution planning for an industrial conglomerate. *Planificación Integrada de Producción Y Distribución Para Un Conglomerado Industrial*, (53), 88–105. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77955652384&partnerID=40&md5=8771c4b91ca789911adb80ae955d1b2a>
- Fuente-Alonso, J. A., Ortega-López, V., Skaf, M., Aragón, Á., & San-José, J. T. (2017). Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements. *Construction and Building Materials*, *149*, 629–638. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.174>

G

- Gamica, P., Delgado, H., Gómez, J., Romero, S., & Alarcón, H. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Secretaría De Comunicaciones Y Transportes. Ciudad De Mexico.
- García Salas, J. L. (2014). *Empleo de residuos de concreto y demolición (RCD) en la construcción de carpetas asfálticas*. Instituto Politécnico Nacional-México.
- Garnica, A. P., Flores, F. M., & Alamilla, D. H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. *Instituto Mexicano Del Transporte*, (267), 105.
- Garnica Amguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. (2005). Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, (271), 62. Retrieved from <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- Ghosh, P. (2011). Polymers in Wastes and their Environmental Impact. *Polymer Science and Technology- Access Engineering*, *3*.
- Ghuzlan, K. A., & Carpenter, S. H. (2006). Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *33*(7), 890–901. <https://doi.org/10.1139/l06-032>
- Ghuzlan, K., & Carpenter, S. (2000). Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1723*(1), 141–149. <https://doi.org/10.3141/1723-18>
- Gökalp, İ., Uz, V. E., Saltan, M., & Tutumluer, E. (2018). Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. *Transportation Geotechnics*, *14*, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.10.003>
- Gómez, C. I. S. (2000). Problemática y gestión de residuos. *Innovar*, (15), 41.
- González, O. (2018). Producción residuos en Acerías Paz del Río S.A. In *Entrevista*. Bogotá.
- Gupta, S., Sahajwalla, V., Burgo, J., Chaubal, P., & Youmans, T. (2005). Carbon structure of coke at high temperatures and its influence on coke fines in blast furnace dust. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, *36*(3), 385–394. <https://doi.org/10.1007/s11663-005-0067-3>

Gutiérrez-junco, O. J., Pineda-triana, Y., & Vera-lópez, E. (2015). Efecto de la incorporación de ceniza volante y escoria de horno alto en el comportamiento electroquímico de concretos de cemento comercial, *51*(4).

H

Harman, T., D'Angelo, J., & Bukowski, J. (2002). Superpave Asphalt Mixture Design Workshop. *US Department of Transportation, Federal Highway Administration*, (90). Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Superpave+Asphalt+Mixture+Design+Workshop+Workbook#0>

Hassan, H. F., Al-Nuaimi, A., Al-Oraimi, S., & Jafar, T. M. A. (2008). Development of asphalt binder performance grades for Omani climate. *Construction and Building Materials*, *22*(8), 1684–1690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.016>

Hernández, R., Limón, P., Sandoval, I., & Cremades, I. (2016). Análisis de la susceptibilidad a la humedad de varios tipos de mezclas asfálticas mediante el módulo dinámico. In *Expo-Asfalto 2017*. Cancún: Congreso Mexicano del Asfalto.

Hernández, V. R., & Marin, J. A. A. (2014). Evolución de las teorías de explotación de recursos naturales: Hacia la creación de una nueva ética mundial. *Luna Azul*, (39), 291–313. <https://doi.org/10.17151/luaz.2014.39.17>

Higuera, C. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. (U. P. y T. de Colombia, Ed.).

Hirsch, R. L. (2008). Mitigation of maximum world oil production: Shortage scenarios. *Energy Policy*, *36*(2), 881–889. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.009>

Hosseinzadeh, N., Rezaei, M. J., & Hosseini, S. M. (2016). Investigation and performance improvement of hot mix asphalt concrete containing EAF slag. *International Journal of Engineering and Technology*, *8*(4), 260–264. <https://doi.org/10.7763/IJET.2016.V8.895>

Howson, J., Masad, E., Bhasin, A., Little, D., & Lytton, R. (2011). Comprehensive analysis of surface free energy of asphalts and aggregates and the effects of changes in pH. *Construction and Building Materials*, *25*(5), 2554–2564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.098>

Hu, J., Liu, P., Wang, D., Oeser, M., & Tan, Y. (2016). Investigation on fatigue damage of asphalt mixture with different air-voids using microstructural analysis. *Construction and Building Materials*, *125*, 936–945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.138>

Hu, T., Sun, T., Kou, J., Geng, C., Wang, X., & Chen, C. (2017). Recovering titanium and iron by co-reduction roasting of seaside titanomagnetite and blast furnace dust. *International Journal of Mineral Processing*, *165*, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.06.003>

Hu, W. tao, Xia, H. wen, Pan, D. ling, Wei, X. lei, Li, J., Dai, X. jie, ... Wang, H. jun. (2018). Difference of zinc volatility in diverse carrier minerals: The critical limit of blast furnace dust recycle. *Minerals Engineering*, *116*(August 2017), 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.001>

Huang, L. S., Lin, D. F., Luo, H. L., & Lin, P. C. (2012). Effect of field compaction mode on asphalt mixture concrete with basic oxygen furnace slag. *Construction and Building Materials*, *34*, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.008>

I

Iluțiu-Varvara, D. A., Mârza, C. M., Domnița, F. V., Boca, I. M. S., & Tintelecan, M. (2017). An Assessment of the Metallic Iron Content from Metallurgical Wastes - Essential Factor for Sustainable Development in the Steelmaking Industry. *Procedia Engineering*, *181*, 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.401>

Instituto Nacional de Vías, C. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. *Manual Para La Inspeccion Visual de Pavimentos Flexibles*, *212*(3456778), 70. Retrieved from http://www.invias.gov.co/index.php/historico-cartelera-virtual/doc_download/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles

- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1995). *Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica*.
- INVIAS. (2013a). *Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua*. Bogotá.
- INVIAS. (2013b). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Bogotá.
- INVIAS. (2013c). *Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos*. Bogotá.
- INVIAS. (2013d). *gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos*. Bogotá.
- INVIAS. (2013e). *Muestreo de agregados para construcción de carreteras*. Bogotá. Retrieved from www.invias.gov.co
- INVIAS. (2013f). *Normas para ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá.
- INVIAS. (2013g). *Penetración de los materiales bituminosos*. Bogotá. Retrieved from www.invias.gov.co
- INVIAS. (2013h). *Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato anillo y bola)*. Bogotá.
- INVIAS. (2013i). *Reducción de muestras de agregado por cuarteo*. Bogotá. Retrieved from www.invias.gov.co
- INVIAS. (2013j). *Suministro de Cemento Asfáltico. Artículo 410-13*. Bogotá. Retrieved from www.invias.gov.co
- Issouribehere, P., Issouribehere, G., & Barbera, G. (n.d.). Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco electrico como cargas en los sistemas de distribucion, 75.

J

- Jitsangiam, P., Chindapasirt, P., & Nikraz, H. (2013). An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. *Construction and Building Materials*, 40, 961–970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.011>
- Josephia, R., & Ossa, A. (2017). Determinación de la vida a fatiga de un concreto asfáltico tibio mediante diferentes enfoques. *Congreso Mexicano Del Asfalto*, (x), 1–15.
- Juckes, L. M. (2017). The volume stability of modern steelmaking slags, 9553(January). <https://doi.org/10.1179/03719550322500370>

K

- Kambole, C., Paige-Green, P., Kupolati, W. K., Ndambuki, J. M., & Adeboje, A. O. (2017). Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials*, 148, 618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>
- Kandhal, P. S., & L.A. Cooley, J. (2001). *NCHRP REPORT 464 - The Restricted Zone In The Superpave Aggregate Gradation Specification*.
- Kavussi, A., & Qazizadeh, M. J. (2014). Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging. *Construction and Building Materials*, 72, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052>
- Kavussi, A., Qazizadeh, M. J., & Hassani, A. (2016). Fatigue Behavior Analysis of Asphalt Mixes Containing Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag, 1(2015), 74–86.
- Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.196>
- Khedaywi, T. S. (2014). Study on utilising waste toner in asphalt cement. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 446–454. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.876925>
- Kim, D., Norouzi, A., Kass, S., Liske, T., & Kim, Y. R. (2017). Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba. *Construction and Building Materials*, 133, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.035>

- Kong, D., Chen, M., Xie, J., Zhao, M., & Yang, C. (2019). Geometric Characteristics of BOF Slag Coarse Aggregate and its Influence on Asphalt Concrete. *Materials*, *12*(5), 741. <https://doi.org/10.3390/ma12050741>
- Kumlai, S., Jitsangiam, P., & Nikraz, H. (2014). Comparison Between Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Western Australian Hot-Mix Asphalt Pavement. *26th ARRB Conference – Research Driving Efficiency*, *7*, 16.

L

- Lachance-Tremblay, É., Vaillancourt, M., & Perraton, D. (2016). Evaluation of the impact of recycled glass on asphalt mixture performances. *Road Materials and Pavement Design*, *17*(3), 600–618. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1103778>
- Leandro, R. P., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. L. B. (2017). Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, *156*, 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.178>
- Leng, Z., Al-Qadi, I., Shangguan, P., & Son, S. (2012). Field Application of Ground-Penetrating Radar for Measurement of Asphalt Mixture Density. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2304*(1), 133–141. <https://doi.org/10.3141/2304-15>
- Leng, Z., Zhang, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Yu, H., & Ling, T. (2018). Laboratory evaluation of electromagnetic density gauges for hot-mix asphalt mixture density measurement. *Construction and Building Materials*, *158*, 1055–1064. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.186>
- Li, C., Chen, Z., Wu, S., Li, B., Xie, J., & Xiao, Y. (2017). Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, *145*, 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.034>
- Li, C., Xiang, X., & Zhou, X. (2015). Investigation of performance of porous open graded steel slag asphalt mixture. *Jianzhu Cailiao Xuebao/J. Build. Mater*, *18*, 168–171. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2015.01.030>
- Li, N., Molenaar, A. A. A., Pronk, A. C., Van De Ven, M. F. C., & Wu, S. (2015). Application of the partial healing model on laboratory fatigue results of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, *95*, 842–849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.127>
- Li, N., Molenaar, A. A. A., Van De Ven, M. F. C., & Wu, S. (2013). Characterization of fatigue performance of asphalt mixture using a new fatigue analysis approach. *Construction and Building Materials*, *45*, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.007>
- Lin, D. F., Chou, L. H., Wang, Y. K., & Luo, H. L. (2015). Performance evaluation of asphalt concrete test road partially paved with industrial waste - Basic oxygen furnace slag. *Construction and Building Materials*, *78*, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.078>
- Liu, G., Jia, Y., Yang, T., Du, H., Zhang, J., & Zhao, Y. (2017). Fatigue performance evaluation of asphalt mixtures based on energy-controlled loading mode. *Construction and Building Materials*, *157*, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.108>
- Loaiza, A., Cifuentes, S., & Colorado, H. A. (2017). Asphalt modified with superfine electric arc furnace steel dust (EAF dust) with high zinc oxide content. *Construction and Building Materials*, *145*, 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.050>
- Loaiza, A., & Colorado, H. A. (2018). Marshall stability and flow tests for asphalt concrete containing electric arc furnace dust waste with high ZnO contents from the steel making process. *Construction and Building Materials*, *166*, 769–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.012>
- Lobato, N. C. C., Villegas, E. A., & Mansur, M. B. (2015). Management of solid wastes from steelmaking and galvanizing processes: A brief review. *Resources, Conservation and Recycling*, *102*, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.025>

- López, F. A., Martín, M. I., Pérez, C., López-Delgado, A., & Alguacil, F. J. (2003). Adsorción de metales pesados sobre cascarilla de laminación. *Revista de Metalurgia*, 39(3), 215–223. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2003.v39.i3.332>
- López Suárez, A. (2017, March). Materiales de construcción jalonan la minería del país. *Portafolio*.
- Lu, T. H., Chen, Y. L., Shih, P. H., & Chang, J. E. (2018). Use of basic oxygen furnace slag fines in the production of cementitious mortars and the effects on mortar expansion. *Construction and Building Materials*, 167, 768–774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.102>
- Lytton, R. L., Zhang, Y., Luo, X., & Luo, R. (2015). *The fatigue cracking of asphalt mixtures in tension and compression. Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100269-8.00008-8>

M

- Ma, X., Ye, L., Qi, C., Yang, D., Shen, X., & Hong, J. (2018). Life cycle assessment and water footprint evaluation of crude steel production: A case study in China. *Journal of Environmental Management*, 224(July), 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.027>
- Mahieux, P. Y., Aubert, J. E., & Escadeillas, G. (2009). Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. *Construction and Building Materials*, 23(2), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.015>
- Mallela, J., Glover, L. T., Darter, M. I., Quintus, H. Von, Gotlif, A., Stanley, M., & Sadasivam, S. (2009). Guidelines for Implementing NCHRP 1-37A M-E Design Procedures in Ohio: Volume 1 — Summary of Findings, Implementation Plan, and Next Steps, 1(134300).
- Manso, J. M., Polanco, J. A., Losañez, M., & González, J. J. (2006). Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 28(6), 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.008>
- Marhual, N. P., Pradhan, N., Mohanta, N. C., Sukla, L. B., & Mishra, B. K. (2011). Dephosphorization of LD slag by phosphorus solubilising bacteria. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 65(3), 404–409. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.01.003>
- Mariño, L. (2016). Materiales de construcción duplicaran producción a 2025. *La Republica*. Retrieved from <https://www.larepublica.co/infraestructura/materiales-de-construccion-duplicaran-produccion-a-2025-2368816>
- Masoudi, S., Abtahi, S. M., & Goli, A. (2017). Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*, 135, 260–266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>
- McCann, M., & Sebaaly, P. (2001). Quantitative Evaluation of Stripping Potential in Hot-Mix Asphalt, Using Ultrasonic Energy for Moisture-Accelerated Conditionung. *Transportation Research Record*, 1767, 48–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/1767-07>
- McGennis, R., Anderson, M., Kennedy, T., & Solaimanian, M. (2012). *Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis* (FHEA-SA-95-003) (Vol. 23).
- McGennis, R. B., Anderson, R. M., Kennedy, T. W., & Solaimanian, M. (1995). BACKGROUND of SUPERPAVE ASPHALT MIXTURE DESIGN AND ANALYSIS. *Fhwa-Sa-95-003*, (February), 160. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.002>
- McGennis, R. B., Shuler, S., & Bahia, H. U. (1994). Background of SUPERPAVE ASPHALT BINDER TEST METHODS, (July), 91.
- Mejía, E., Tobón, J. I., Osorno, L., & Osorio, W. (2015). Mineralogical characterization of urban construction and demolition waste : potential use as a nutrient source for degraded soils. *The Sustainable Cities*, 194, 399–413. <https://doi.org/10.2495/SC150351>
- Minería, A. N. de. (2018). Así se movieron las cifras de producción de minerales en 2017.

- Mohseni, A. (1998). *LTPP Seasonal Asphalt Concrete (AC) Pavement Temperature Models* (Vol. 7).
- Molina, C. E. C. (2013). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá. *Efeito Do Condicionamento Ambiental Em Compósitos Soldados de PPS/fibras Continuas*, 129.
- Morea, F., & Zerbino, R. (2018). Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 164, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.198>
- Moreno, M. Á., & Soares, J. B. (2015). El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación. *Asfalto Y Pavimentación*, V(16), 9–19. <https://doi.org/ISSN:2174-2189>
- Muniandy, R., Aburkaba, E., & Mahdi, L. M. J. (2013). Effect of Mineral Filler Type and Particle Size on Asphalt-Filler Mastic and Stone Mastic Asphalt Laboratory Measured Properties. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(11), 475–487.
- Muniandy, R., Akhir, N. A. C. M., Hassim, S., & Moazami, D. (2014). Laboratory fatigue evaluation of modified and unmodified asphalt binders in Stone Mastic Asphalt mixtures using a newly developed crack meander technique. *International Journal of Fatigue*, 59, 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.021>
- Muzaffar Khan, K., Sultan, T., Umar Farooq, Q., Khan, K., & Ali, F. (2013). Development of superpave performance grading map for Pakistan. *Life Science Journal*, 10(SUPPL. 7), 355–362. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

N

- NCHRP. (2011). *A Manual for Design of Hot-Mix Asphalt with Commentary*. Washington. <https://doi.org/10.17226/14524>
- Nega, A., Ghadimi, B., & Nikraz, H. (2015). Developing Master Curves, Binder Viscosity and Predicting Dynamic Modulus of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3), 190–197. <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.790>

O

- Ochoa-Díaz, R. (2013). Analysis of the use of coal tar as a binder in bituminous mixtures, using Marshall and Ramcodes methodologies. *Journal of Physics: Conference Series*, 466(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/466/1/012034>
- Ochoa Díaz, R. (2012). Diseño de mezclas bituminosas para pavimentos con alquitrán, usando las metodologías Marshall y Ramcodes 1. *Respuestas*, 17(2), 63–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.22463/issn.0122-820X>
- Omran, M., & Fabritius, T. (2017). Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technology*, 308, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>
- Ortega, F. (1999). *Diccionario de Medio Ambiente y materias afines*.
- Ossa, A., García, J. L., & Botero, E. (2016). Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 135, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.088>
- Ovalle, G. O. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. *Revista de Ingeniería; Núm. 44 (2016): Revista de Ingeniería*, 20–27. Retrieved from <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/911>

P

- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Capítulo 4: Deformaciones plásticas en capas de rodadura de pavimentos asfálticos*. Universidad Politécnica de Cataluña. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>

- Parish, C. M., White, R. M., Lebeau, J. M., & Miller, M. K. (2014). Response of nanostructured ferritic alloys to high-dose heavy ion irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 445(1–3), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.11.002>
- Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2017). Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. *Construction and Building Materials*, 157, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.090>
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2010). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 938–948. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.104>
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2011). Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3458–3468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037>
- Pasetto, M., & Baldo, N. (2017). Dissipated energy analysis of four-point bending test on asphalt concretes made with steel slag and RAP. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 446–453. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.004>
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2017). Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *Journal of Cleaner Production*, 166(x), 835–843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.212>
- Pastas, C. (2017). Proceso Alto Horno. In *Entrevista* (p. Departamento Alto Horno, Acerías Paz del Río S.A.). Belencito.
- Peiwen, H., & Dengliang, Z. (1997). The effect of aggregate alkalinity on water stability of asphalt mixtures. *JOURNAL OF CHONGQING JIAOTONG UNIVERSITY*, 16(1), 80–85. Retrieved from <http://worldcat.org/issn/10074112>
- Pérez, G. (2017). *Metodología Marshall para diseño de mezclas asfálticas, Apuntes de Clase*. Tunja.
- Poh, H. Y., Ghataora, G. S., & Ghazireh, N. (2006). Soil Stabilization Using Basic Oxygen Steel Slag Fines, (April), 229–240.
- Portugal, A. C. X., Lucena, L. C. de F. L., Lucena, A. E. de F. L., Costa, D. B., & Lima, K. A. de. (2017). Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil. *Construction and Building Materials*, 152, 1015–1026. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.077>
- Pronk, A. C. (1997). Comparison of 2 and 4 point fatigue tests and healing in 4 point dynamic bending test based on the dissipated energy concept. *Eighth International Conference on Asphalt Pavements, II*, 987–994.
- Pronk, A. C., & Hopman, P. C. (1991). Energy Dissipation: The Leading factor of fatigue. *Highway Research Sharing the Benefits*, 17, 255–267. <https://doi.org/http://worldcat.org/isbn/0727716352>

R

- Rath, S. S., Srinivas, D., Kumar, S., & Biswal, S. K. (2018). Characterization vis-à-vis utilization of blast furnace flue dust in the roast reduction of banded iron ore. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.007>
- Reyes, F. A., & Figueroa, A. S. (2016). Análisis de la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla asfáltica a partir del ensayo mist y del programa ipas 2d ®. *Revista Infraestructura Vial - LanammeUCR*, 17(2215–3705), 31–39.
- Roberts, F. L., Kandhal, E., Brown, E., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. (Research and Education Foundation, Ed.) (2nd ed.). Lanham.
- Romero, T. (2018). *Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del exlago Texcoco*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Rondón, Hugo & Reyes, F. (2016). *Pavimentos. Materiales, construcción y diseño*. (Ecoe Ediciones Ltda, Ed.) (Primera). Bogotá.
- Rowe, G. M. (1993). Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test. *Asphalt Paving Technology*. Retrieved from http://www.abatech.com/documents/1993_Rowe_Perf_of_Asphalt_Mixtures_in_the_Trapezoidal_Fatigue_Test_v62p343.pdf
- Ruuska, J., Sorsa, A., Ollila, S., & Leiviskä, K. (2015). Analysis of splashing in basic oxygen furnace through systematic modelling. *IFAC-PapersOnLine*, 28(17), 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.098>

S

- Saha, G., & Biligiri, K. P. (2016). Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research. *Construction and Building Materials*, 105, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.046>
- Saleh, A. M. M., & Trad, M. A. (2011). Generation of asphalt performance grading map for Egypt based on the SUPERPAVE™ program. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2248–2253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.009>
- Sánchez-leal, Freddy J., Garnica, P., Gómez, J., & Pérez, N. (2002). Ramcodes: Metodología racional para el análisis de densificación de geomateriales compactados. *Publicación Técnica 200, Instituto(0188–7297)*, 1–48.
- Sánchez-Leal, F. J. (2007). Gradation Chart for Asphalt Mixes : Development. *Journal of Materials in Civil Engineering in Civil Engineering*, 19(2), 185–197. <https://doi.org/10.1061/?ASCE?0899-1561?2007?19:2?185?>
- Sánchez-Leal, F. J. (2009). *Manual de Aplicación - Metodología de Análisis y Diseño de Geomateriales Compactados*. (Ramcodes, Ed.) (3rd ed.).
- Sánchez-Leal, F. J. (2011). *Supertraining Uso exitoso de las Herramientas RAMCODES*.
- Sánchez-Leal, F. J. (2018). Diseño acelerado de Mezclas Asfálticas con el Polígono de Vacíos. Metodología Ramcodes. In *Curso*.
- Sánchez-Leal, F. J., Anguas, P. G., Larreal, M., & Valdés, D. B. L. (2011). Polyvoids : Analytical Tool for Superpave HMA Design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1129–1137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000275](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000275).
- Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>
- SCT. (2005). *CMT. Características de los materiales - Calidad de Materiales Asfálticas Grado PG* (No. N-CMT-4-05-004/05). Ciudad De Mexico.
- Shawabkeh, R. A. (2010). Hydrometallurgical extraction of zinc from Jordanian electric arc furnace dust. *Hydrometallurgy*, 104(1), 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.04.014>
- Shen, D. H., Wu, C. M., & Du, J. C. (2009). Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 23(1), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H., & Huang, H. (2006). A dissipated energy approach to fatigue evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 7(1), 47–69. <https://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690026>
- Shen, S., Chiu, H.-M., & Huang, H. (2010). Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(9), 846–852. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000080](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000080)
- Sheng, Y., Zhang, B., Yan, Y., Chen, H., Xiong, R., & Geng, J. (2017). Effects of phosphorus slag powder and polyester fiber on performance characteristics of asphalt binders and resultant mixtures. *Construction and Building Materials*, 141, 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.141>

- Shi, X., Cai, L., Xu, W., Fan, J., & Wang, X. (2018). Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen. *Construction and Building Materials*, *161*, 705–714. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.162>
- Simone, A., Mazzotta, F., Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2017). Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, *0*(0), 1–16. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1407818>
- Siracusa, G., La Rosa, A. D., Siracusa, V., & Trovato, M. (2002). Eco-Compatible Use of Olive Husk as Filler in Thermoplastic Composite. *Journal of Polymers and the Environment*, *9*(4), 157–161. <https://doi.org/10.1023/A:1020465305193>
- Skaf, M., Manso, J. M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J. A., & Ortega-López, V. (2017). EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*, *120*, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
- Sorlini, S., Sanzeni, A., & Rondi, L. (2012). Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, *209–210*, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.066>
- Souliman, M., & Zeiada, W. (2012). Assessment of different flexure fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures. *Four Point Bending ...*, 27–34. Retrieved from <http://books.google.com/books>
- Stempihar, J., Underwood, S., & Kaloush, K. (2015). Resilient Modulus to Dynamic Modulus Relationship and Pavement Analysis with the Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide. *National Center of Excellence for Smart Innovations*, (April), 1–6.

T

- Tan, Y., & Guo, M. (2013). Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, *47*, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.067>
- Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Lidstrom Larsson, M., & Bjorkman, B. (2007). Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste Management*, *27*(10), 1335–1344. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.08.002>
- Transportation Research Board, S. C. (2005). *Superior Performing Asphalt Pavement SUPERPAVE Performance by Design*.

U

- Uzun, S., & Terzi, S. (2012). Evaluation of andesite waste as mineral filler in asphaltic concrete mixture. *Construction and Building Materials*, *31*, 284–288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.093>

V

- Vacca-Gomez, H. A., Leon-Neira, M. P., & Ruiz-Valencia, D. M. (2012). Evaluation of the rolling thin film oven aging of the 80-100 asphalt cement in the static and dynamic behavior of asphalt mixture. *Ingenieria Y Universidad*, *16*(0123–2126), 379–396.
- Vanegas Solís, J. A. (2013). *Manual de diseño de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa de alto desempeño con protocolo AMAAC*. Instituto Politecnico Nacional, México.
- Velázquez, R. T., Villares, H. H., & Zepeda, F. R. (2017). Prueba de desempeño en diferentes mezclas asfálticas. *Entretextos*, *24*(2007–5316), 97–107.
- Villafuerte Pérez, D. I. (2018). *Diseño de mezclas asfálticas elaboradas con concreto asfálticos reciclado y agentes rejuvenecedores*. Universidad Nacional Autonoma de México.

W

- Waligora, J., Bulteel, D., Degrugilliers, P., Damidot, D., Potdevin, J. L., & Measson, M. (2010). Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach. *Materials Characterization*, *61*(1), 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.10.004>
- Wang, Y., Chong, D., & Wen, Y. (2017). Quality verification of polymer-modified asphalt binder used in hot-mix asphalt pavement construction. *Construction and Building Materials*, *150*, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.196>
- Warren, R. S., McGennin, R. B., & Bahia, H. U. (1994). Superpave Asphalt Binder Test Method Overview, 1–53.
- Wen, H., Wu, S., & Bhusal, S. (2016). Performance Evaluation of Asphalt Mixes Containing Steel Slag Aggregate as a Measure to Resist Studded Tire Wear. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *28*(5), 4015191. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001475](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001475)

X

- Xi, J., Xiang, X., & Li, C. (2016). Process Improvement on the Gradation Uniformity of Steel Slag Asphalt Concrete Aggregate. *Procedia Environmental Sciences*, *31*, 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.115>
- Xie, J., Chen, J., Wu, S., Lin, J., & Wei, W. (2013). Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag. *Construction and Building Materials*, *38*, 796–803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.056>
- Xie, J., Wu, S., Lin, J., Cai, J., Chen, Z., & Wei, W. (2012). Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation. *Construction and Building Materials*, *36*, 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.023>
- Xie, J., Wu, S., Zhang, L., Xiao, Y., Liu, Q., Yang, C., & Nie, S. (2017). Material characterization and performance evaluation of asphalt mixture Incorporating basic oxygen furnace slag (BOF) sludge. *Construction and Building Materials*, *147*, 362–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.131>
- Xu, G., Wang, H., & Zhu, H. (2017). Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. *Construction and Building Materials*, *151*, 801–808. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151>
- Xu, S., Xiao, F., Amirkhanian, S., & Singh, D. (2017). Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies – A review. *Construction and Building Materials*, *142*, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069>
- Xu, T., Wang, H., Li, Z., & Zhao, Y. (2014). Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using different laboratory performance tests. *Construction and Building Materials*, *53*, 561–567. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.015>
- Yao, Z., Zhang, J., Gao, F., Liu, S., & Yu, T. (2018). Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen. *Construction and Building Materials*, *170*, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.080>

Y

- Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, *2011*. <https://doi.org/10.1155/2011/463638>
- Yu, B., Li, X., Shi, L., & Qian, Y. (2015). Quantifying CO₂ emission reduction from industrial symbiosis in integrated steel mills in China. *Journal of Cleaner Production*, *103*, 801–810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.015>

Z

- Zakaria, N. M., Hassan, M. K., Ibrahim, A. N. H., Rosyidi, S. A. P., Yusoff, N. I. M., Mohamed, A. A., & Hassan, N. (2018). The use of mixed waste recycled plastic and glass as an aggregate replacement in asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi*, 80(1), 79–88. <https://doi.org/10.11113/jt.v80.11147>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>
- Zeydabadi, B. A., Mowla, D., Shariat, M. H., & Kalajahi, J. F. (1997). Zinc recovery from blast furnace flue dust, 47, 113–125.
- Zhang, D., Zhang, X., Yang, T., Rao, S., Hu, W., Liu, W., & Chen, L. (2017). Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems. *Hydrometallurgy*, 169, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>
- Zhang, J., Simate, G. S., Hu, X., Souliman, M., & Walubita, L. F. (2017). Impact of recycled asphalt materials on asphalt binder properties and rutting and cracking performance of plant-produced mixtures. *Construction and Building Materials*, 155, 654–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.084>
- Zhou, F., Scullion, T., & Sun, L. (2004). Verification and modeling of three-stage permanent deformation behaviour of asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, 130(4), 486–494.
- Ziari, H., Nowbakht, S., Rezaei, S., & Mahboob, A. (2015). Laboratory Investigation of Fatigue Characteristics of Asphalt Mixtures with Steel Slag Aggregates, 2015.