

**SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A CAMBIOS
VOLUMÉTRICOS GENERADOS POR LA COMPACTACIÓN ADICIONAL EN
CONDICIONES DE SERVICIO**

**JULIÁN IGNACIO BELTRÁN VALENCIA
VICTORIA EUGENIA MUÑOZ VALENCIA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2008**





SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A CAMBIOS VOLUMÉRICOS
GENERADOS POR LA COMPACTACIÓN EN CONDICIONES DE SERVICIO

**SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A CAMBIOS
VOLUMÉTRICOS GENERADOS POR LA COMPACTACIÓN ADICIONAL EN
CONDICIONES DE SERVICIO**

**JULIÁN IGNACIO BELTRÁN VALENCIA
VICTORIA EUGENIA MUÑOZ VALENCIA**

**Tesis para optar al título de:
Magister en Ingeniería de Vías Terrestres**

Director: Ing. Msc. Julia Eugenia Ruiz

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES
POPAYÁN
2008**



Nota de aceptación

Director(a) de Tesis

Jurado

Jurado

Popayán, Noviembre de 2008



DEDICATORIA

A Dios por permitirnos trabajar continuamente durante todo el proceso de desarrollo de esta investigación, por brindarnos la confianza y seguridad para sortear los diferentes inconvenientes que se nos presentaron y alcanzar así las metas que nos propusimos y por darnos la oportunidad de compartir y disfrutar de cada momento vivido durante el desarrollo de este trabajo.

A nuestras familias quienes nos motivaron e impulsaron para sacar este trabajo adelante y de esta forma lograr una meta más en nuestras vidas, en especial a nuestras hijas Juliana Manuela y Mariana quienes llegaron a nuestras vidas durante el desarrollo de esta investigación e incentivaron mucho más nuestro empeño por sacar adelante este trabajo.

A la Ingeniera Julia Eugenia Ruiz, quien además de su apoyo como Directora de Tesis, nos brindó su amistad y cariño permitiéndonos trabajar de esta forma en un ambiente de confianza y cordialidad durante el desarrollo de esta investigación.



AGRADECIMIENTOS

Mencionamos las personas y entidades que nos brindaron su colaboración y aporte y que fueron parte fundamental en el desarrollo y culminación de esta investigación.

Agradecemos a la firma Corredores Viales 2 y en especial a los Ingenieros Javier Caicedo y Lina Pastrana quienes nos facilitaron los agregados y ligante asfáltico para el desarrollo de los trabajos de laboratorio de esta investigación

A la Ingeniera Julia Eugenia Ruiz, Directora de Tesis, quien nos brindó todo su apoyo y asesoría profesional de forma incondicional y nos guío en el desarrollo de cada actividad de trabajo.

Al Ingeniero Ary Fernando Bustamante, Director del Instituto de Posgrado en Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, quien nos brindó el apoyo económico necesario para la consecución de materiales y elementos de trabajo.

A la Universidad del Cauca por facilitarnos las instalaciones y equipos de los laboratorios de Materiales, Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil y por permitirnos contar con la colaboración del Geotecnólogo Oscar Orozco y los auxiliares de laboratorio Mario Lasso y Gabriel Lasso.



CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
I. Justificación	23
II. Alcances	24
III. Objetivos	26
1. MARCO TEÓRICO	28
1.1 Introducción	29
1.2 La mezcla asfáltica y sus materiales constitutivos	30
1.2.1 Agregados pétreos	30
1.2.1.1 Propiedades	31
1.2.1.1.1 Gradación y tamaño máximo	31
1.2.1.1.2 Textura superficial	35
1.2.1.1.3 Porosidad	36
1.2.1.1.4 Afinidad por el asfalto	37
1.2.1.1.5 Gravedad específica	37
1.2.1.1.6 Limpieza	39
1.2.1.1.7 Resistencia de las partículas	40



1.2.1.1.8	Forma de las partículas	41
1.2.2	Ligante asfáltico	43
1.2.2.1	Composición química	44
1.2.2.2	Propiedades físicas	47
1.2.2.2.1	Durabilidad	48
1.2.2.2.1.1	Endurecimiento y envejecimiento del asfalto	49
1.2.2.2.2	Adhesión y cohesión	50
1.2.2.2.3	Susceptibilidad a la temperatura	51
1.3	Volumetría de mezclas asfálticas compactadas en caliente	53
1.4	Factores que influyen en la variación del contenido de vacíos de aire (Va) y en el ahuellamiento de las mezclas asfálticas durante el servicio	60
1.4.1	Factores que influyen en la variación del contenido de vacíos de aire (Va)	60
1.4.1.1	Tránsito	61
1.4.1.2	Compactación durante la construcción (Va iniciales)	62
1.4.1.2.1	Factores que intervienen en la compactación de la mezcla durante el proceso constructivo	64
1.4.1.2.1.1	Características del ligante	64
1.4.1.2.1.2	Temperatura de la mezcla	64
1.4.1.2.1.3	Condiciones ambientales	66
1.4.1.3	Características de la mezcla y el ligante	70
1.4.1.3.1	Tipos de gradaciones en las mezclas asfálticas	70



1.4.1.3.2	Tipos de ligante en las mezclas asfálticas	71
1.4.1.3.3	Espesor de película de ligante asfáltico que cubre las partículas	72
1.4.2	Factores que influyen en el ahuellamiento	73
1.5	Estándares volumétricos	78
1.5.1	Artículo 450 INV-07 mezclas asfálticas en caliente	78
1.5.2	Estándares volumétricos SUPERPAVE, norma AASHTO M 323-04	79
1.6	El compactador giratorio	80
1.6.1	Historia del compactador giratorio	81
1.6.1.1	compactaciones giratorias	81
2.	METODOLOGÍA	86
2.1	Introducción	87
2.2	Secuencia de actividades	88
1º.	Documentación bibliográfica	88
2º.	Conceptualización y análisis de las relaciones volumétricas	88
3º.	Selección de las normas de ensayos de laboratorio y de procedimientos para diseño de mezclas asfálticas en caliente	88
4º.	Selección de los agregados pétreos y el ligante asfáltico	88
5º.	Selección de las tres (3) gradaciones de trabajo	90
6º.	Caracterización de agregados	92
7º.	Caracterización del ligante asfáltico	94
8º.	Selección de los tres (3) Índices de Espesor de Película de Ligante y determinación del porcentaje de ligante (% Pb).	96



9º. Elaboración de las mezclas para cada granulometría seleccionada y compactación de especímenes.	99
a. Elaboración de mezclas	99
i. Preparación del agregado	99
ii. Preparación del ligante	100
iii. Mezcla de agregados y ligante	101
b. Acondicionamiento de las mezclas para simular la absorción de asfalto en campo y envejecimiento a corto plazo, de acuerdo a la norma AASHTO R 30-02	103
10º. Determinación de la gravedad específica máxima teórica (Gmm) de las mezclas para cada combinación de gradación e IPL, de acuerdo a la norma INV E-735-07	104
11º. Elaboración de especímenes	106
12º. Determinación de la gravedad específica bulk (Gmb) de los especímenes compactados	108
13º. Fabricación de especímenes con la volumetría requerida	109
14º. Acondicionamiento ambiental de las briquetas para simular las condiciones medias de trabajo	121
15º. Compactación adicional en condiciones de servicio	124
16º. Evaluación de los especímenes en condiciones finales	126
17º. Compilación, sistematización y análisis de la información obtenida en el laboratorio	126
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	129
3.1 Introducción	129
3.2 Comportamiento de la gravedad específica del agregado (Gse) de un material al variar la granulometría y la cantidad de asfalto	130
3.3 Trabajabilidad de las mezclas en condiciones de construcción	132
3.3.1 Trabajabilidad de la gradación MDC-2	134
3.3.2 Trabajabilidad de la gradación SUPERPAVE	137
3.3.3 Trabajabilidad de la gradación MSC-2	142



3.3.4	Trabajabilidad integral de las gradaciones MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2	145
3.4	Tendencia a la variabilidad volumétrica por acción del tránsito pesado en condiciones de operación	149
3.4.1	Análisis de la incidencia de la gradación en la susceptibilidad de las mezclas a la compactación adicional en condiciones de servicio	150
3.4.1.1	Gradación para MDC-2	151
3.4.1.2	Gradación para SUPERPAVE	155
3.4.1.3	Gradación para MSC-2	159
3.4.1.4	Gradación para MSC-2-A	163
3.4.2	Análisis de la incidencia del IPL en la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a la compactación adicional en condiciones de servicio	165
3.4.2.1	Mezclas con IPL de 6.8	165
3.4.2.2	Mezclas con IPL de 7.2	168
3.4.2.3	Mezclas con IPL de 7.7	171
3.4.2.4	Mezclas MSC-2-A con IPL de 5.7 y 6.0	173
3.4.3	Análisis integral de la susceptibilidad de las mezclas a la compactación adicional en condiciones de servicio	175
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	183
4.1	Conclusiones del análisis del comportamiento del Gse de un material al variar la Gradación y el contenido de ligante	183
4.2	Conclusiones del análisis de trabajabilidad de las mezclas en las condiciones de Construcción	183



4.3 Conclusiones del análisis de la tendencia a la variabilidad volumétrica por acción del tránsito pesado en condiciones de operación	185
4.4 Recomendaciones	186
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191
6. ANEXOS	194



ÍNDICE DE IMÁGENES

	Pág.
IMAGEN N° 1. Extendido de mezcla asfáltica	30
IMAGEN N° 2. Agregados pétreos	30
IMAGEN N° 3. Tamizado por vía húmeda	32
IMAGEN N° 4. Agregado grueso (retiene N° 4)	33
IMAGEN N° 5. Agregado fino (pasa N° 4)	33
IMAGEN N° 6. Ensayo de densidad aparente en Tolueno	33
IMAGEN N° 7. Ensayo de equivalente de arena	39
IMAGEN N° 8. Ensayo de azul de metileno	39
IMAGEN N° 9. Máquina de los Ángeles	40
IMAGEN N° 10. Ensayo de sanidad o solidez de agregados	40
IMAGEN N° 11. Micro-Deval	40
IMAGEN N° 12. Agregados triturados	41
IMAGEN N° 13. Agregados de río	41
IMAGEN N° 14. Ensayo de angularidad de agregado fino	42
IMAGEN N° 15. Ensayo de índice de alargamiento	43
IMAGEN N° 16. Ensayo de índice de aplanamiento	43
IMAGEN N° 17. Ensayo de partículas de agregado alargadas, aplanadas y alargadas y aplanadas	43
IMAGEN N° 18. Cemento asfáltico	43



IMAGEN N° 19. Ensayo de película delgada RTOF	48
IMAGEN N° 20. Ensayo de película delgada TOF	48
IMAGEN N° 21. Ensayo de ductilidad	50
IMAGEN N° 22. Ensayo de viscosidad	52
IMAGEN N° 23. Ensayo de penetración	52
IMAGEN N° 24. Mezcla asfáltica en el habitáculo de una volqueta	65
IMAGEN N° 25. Temperatura de la mezcla asfáltica en el habitáculo de la volqueta	65
IMAGEN N° 26. Temperatura de mezcla extendida	66
IMAGEN N° 27. Temperatura de mezcla extendida	66
IMAGEN N° 28. Prensa giratoria de Texas	82
IMAGEN N° 29. Compactador de amasado giratorio del Cuerpo de Ingenieros	82
IMAGEN N° 30. Francis Moutier (LCPC) con el PCG-2	83
IMAGEN N° 31. Compactador giratorio Superpave (SCG)	84
IMAGEN N° 32. Compactador giratorio Australiano (SERVOPAC)	85
IMAGEN N° 33. Agregados de trabajo	88
IMAGEN N° 34. Tamizado de agregados	89
IMAGEN N° 35. Separación en tamaños	89
IMAGEN N° 36. Almacenamiento y referenciación	89
IMAGEN N° 37. Cemento asfáltico (ligante) de trabajo	90
IMAGEN N° 38. Gradaciones de trabajo	90
IMAGEN N° 39. Fracciones granulométricas	90
IMAGEN N° 40. Cemento asfáltico 60-70	94



IMAGEN N° 41. Secado de agregados	100
IMAGEN N° 42. Pesadas para elaboración de mezclas	100
IMAGEN N° 43. Calentamiento de agregados para elaboración de mezclas	100
IMAGEN N° 44. Calentamiento del asfalto para que adquiera la viscosidad de mezclado	101
IMAGEN N° 45. Proceso de mezclado de los agregados y el ligante	101
IMAGEN N° 46. Disposición de la mezcla en bandeja para la elaboración de especímenes	102
IMAGEN N° 47. Disposición de la mezcla en bandeja para la determinación del Gmm	103
IMAGEN N° 48. Acondicionamiento de las mezclas a corto plazo	103
IMAGEN N° 49. Pesada de muestra de mezcla asfáltica para medición de Gmm	105
IMAGEN N° 50. Acondicionamiento de muestras de mezcla asfáltica para medir Gmm	105
IMAGEN N° 51. Equipo para la determinación del Gmm	105
IMAGEN N° 52. Compactador giratorio Superpave (SCG)	106
IMAGEN N° 53. Molde de compactación	107
IMAGEN N° 54. Compactación de la mezcla	107
IMAGEN N° 55. Extracción del espécimen del molde de compactación	107
IMAGEN N° 56. Especímenes elaborados para las diferentes combinaciones de gradación, IPL y % de Va	108
IMAGEN N° 57. Determinación del peso en el agua de cada espécimen para la medición del Gmb	108
IMAGEN N° 58. Briquetas de ajuste	109
IMAGEN N° 59. Colocación de la mezcla en el molde de compactación	113



IMAGEN N° 60. Control de la temperatura de compactación	113
IMAGEN N° 61. Grupos de trabajo para la compactación adicional	114
IMAGEN N° 62. Grupo para el acondicionamiento ambiental de la mezcla MDC-2 con IPL de 7.7	121
IMAGEN N° 63. Acondicionamiento ambiental con especímenes de prueba	124
IMAGEN N° 64. Disposición del espécimen acondicionado en el molde de compactación	125
IMAGEN N° 65. Alimentación del software del SCG con los parámetros de compactación	125
IMAGEN N° 66. Compactación adicional de especímenes en condiciones de servicio	125
IMAGEN N° 67. Determinación de la masa seca del espécimen en condición saturada y superficialmente seca, para la medición del Gmb de los especímenes compactados con energía adicional	126



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA N° 1. Curva de gradación en un gráfico semilogarítmico	34
FIGURA N° 2. Curva de gradación en un gráfico de potencia 0.45	34
FIGURA N° 3. Vacíos permeables en una partícula de agregado	38
FIGURA N° 4. Ilustración del volumen V_{se} , volumen de sólidos más volumen de los poros no llenos de asfalto	39
FIGURA N° 5. Ensayo de angularidad de agregado grueso	42
FIGURA N° 6. Curva de susceptibilidad térmica (reológica) del asfalto	50
FIGURA N° 7. Dependencia tiempo – temperatura del cemento asfáltico	51
FIGURA N° 8. Diagrama de fases	54
FIGURA N° 9. Diagrama de fases (volúmenes y masas considerados en el análisis volumétrico)	54
FIGURA N° 10. Diagrama de fases para G_{se}	57
FIGURA N° 11. Diagrama de fases para G_{mm}	59
FIGURA N° 12. Diagrama de fases para G_{mb}	59
FIGURA N° 13. Durabilidad del pavimento versus V_a	63
FIGURA N° 14. Mapa del promedio multianual de temperatura	68
FIGURA N° 15. Curva reológica del asfalto utilizado	95
FIGURA N° 16. Effective Specific Gravity (G_{se})	131
FIGURA N° 17. Gradaciones de trabajo	132
FIGURA N° 18. Trabajabilidad MDC-2 con IPL de 6.8 y 7.2	134



FIGURA N° 19. Trabajabilidad MDC-2 y ajuste de giros con IPL 6.8	135
FIGURA N° 20. Trabajabilidad MDC-2 y ajuste de giros con IPL 7.2	136
FIGURA N° 21. Trabajabilidad SUPERPAVE con IPL de 6.8, 7.2 y 7.7	138
FIGURA N° 22. Trabajabilidad SUPERPAVE y ajuste de giros con IPL 6.8	139
FIGURA N° 23. Trabajabilidad SUPERPAVE y ajuste de giros con IPL 7.2	140
FIGURA N° 24. Trabajabilidad SUPERPAVE y ajuste de giros con IPL 7.7	140
FIGURA N° 25. Trabajabilidad SUPERPAVE con dos temperaturas 132 y 135°C	141
FIGURA N° 26. Trabajabilidad MSC-2 con IPL de 6.8, 7.2 y 7.7	142
FIGURA N° 27. Trabajabilidad MSC-2 y ajuste de giros con IPL 6.8	143
FIGURA N° 28. Trabajabilidad MSC-2 y ajuste de giros con IPL 7.2	144
FIGURA N° 29. Trabajabilidad MSC-2 y ajuste de giros con IPL 7.7	145
FIGURA N° 30. Trabajabilidad MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2 con IPL 6.8	146
FIGURA N° 31. Trabajabilidad MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2 con IPL 7.2	147
FIGURA N° 32. Trabajabilidad MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2 con IPL 7.7	147
FIGURA N° 33. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MDC-2 con IPL de 6.8	151
FIGURA N° 34. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MDC-2 con IPL de 7.2	152
FIGURA N° 35. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MDC-2 con IPL de 7.7	153
FIGURA N° 36. Respuesta a la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE con IPL de 6.8	155
FIGURA N° 37. Respuesta a la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE con IPL de 7.2	156



FIGURA N° 38. Respuesta a la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE con IPL de 7.7	156
FIGURA N° 39. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2 con IPL de 6.8	160
FIGURA N° 40. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2 con IPL de 7.2	160
FIGURA N° 41. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2 con IPL de 7.7	161
FIGURA N° 42. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2-A con IPL de 5.7	163
FIGURA N° 43. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2-A con IPL de 6.0	164
FIGURA N° 44. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 6.8 y temperatura de servicio de 35°C	166
FIGURA N° 45. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 6.8 y temperatura de servicio de 45°C	166
FIGURA N° 46. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 6.8 y temperatura de servicio de 55°C	167
FIGURA N° 47. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.2 y temperatura de servicio de 35°C	168
FIGURA N° 48. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.2 y temperatura de servicio de 45°C	169
FIGURA N° 49. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.2 y temperatura de servicio de 55°C	169
FIGURA N° 50. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.7 y temperatura de servicio de 35°C	171
FIGURA N° 51. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.7 y temperatura de servicio de 45°C	172



FIGURA N° 52. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.7 y temperatura de servicio de 55°C	172
FIGURA N° 53. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 5.7 y 6.0 y temperatura de servicio de 35°C	174
FIGURA N° 54. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 5.7 y 6.0 y temperatura de servicio de 45°C	174
FIGURA N° 55. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 5.7 y 6.0 y temperatura de servicio de 55°C	175
FIGURA N° 56. Variación volumétrica de las mezclas con IPL de 6.8	176
FIGURA N° 57. Variación volumétrica de las mezclas con IPL de 7.2	177
FIGURA N° 58. Variación volumétrica de las mezclas con IPL de 7.7	178
FIGURA N° 59. Variación volumetrica de las mezclas MSC-2-A con IPL de 5.7 y 6.0	181



ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
CUADRO N° 1. Criterios para diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall. INV artículo 450-07	78
CUADRO N° 2. Criterios para diseño de mezcla por el método Superpave. AASHTO M 323-04	79
CUADRO N° 3. Esfuerzos a aplicar en el SCG	80
CUADRO N° 4. Gradaciones de trabajo	91
CUADRO N° 5. Resumen de resultados de ensayos de laboratorio	93
CUADRO N° 6. Datos de cálculo de los IPL de algunas mezclas trabajadas en Colombia	97
CUADRO N° 7. Datos de cálculo de los IPL de las mezclas trabajadas en la Investigación	99
CUADRO N° 8. Número de especímenes de trabajo elaborados para % de Va comprendidos entre 3.5 y 7.5	102
CUADRO N° 9. Valores de Gmm de las mezclas trabajadas	105
CUADRO N° 10. Datos obtenidos en el laboratorio para la determinación del Gmb y % de Va inicial de los especímenes elaborados con gradación MDC-2 e IPL de 6.8	110
CUADRO N° 11. % de Gmm para los giros iniciales, de diseño y máximos en una “briqueta de ajuste a giros” con gradación MDC-2 e IPL de 6.8. Información arrojada por el SCG	111
CUADRO N° 12. Variación de alturas por giro aplicado en una “briqueta de ajuste a giros” con gradación MDC-2 e IPL de 6.8. Información arrojada por el SCG	112



CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros” con gradación MDC-2 e IPL de 6.8	115
CUADRO N° 14. Grupos conformados para el acondicionamiento a las temperaturas de 35, 45 y 55°C, correspondientes a la gradación MDC-2 e IPL de 6.8	122
CUADRO N° 15. Temperaturas de mezcla en función de la temperatura del aire para una latitud de 12°26'46” en diferentes ciudades Colombianas	123
CUADRO N° 16. Datos obtenidos en laboratorio para la determinación del Gmb y % de Va finales, luego de la compactación adicional, para los especímenes de la gradación MDC-2 con IPL de 6.8 y temperaturas de acondicionamiento de 35, 45 y 55°C	127
CUADRO N° 17. Valores de Gse calculados para cada % de Pb	130
CUADRO N° 18. Valores de IPL	133
CUADRO N° 19. Variación del porcentaje de Gmm	148
CUADRO N° 20. Valores de declive de compactación	149
CUADRO N° 21. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 4% por efecto de la compactación adicional en mezclas MDC-2	153
CUADRO N° 22. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas MDC-2	154
CUADRO N° 23. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 6% por efecto de la compactación adicional en mezclas MDC-2	154
CUADRO N° 24. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 4% por efecto de la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE	157
CUADRO N° 25. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE	158
CUADRO N° 26. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 6% por efecto de la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE	158
CUADRO N° 27. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 4% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2	162



CUADRO N° 28. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2	162
CUADRO N° 29. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 6% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2	162
CUADRO N° 30. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2-A	164
CUADRO N° 31. % de Va finales para valores de % de Va inicial del 4, 5 y 6 por efecto de la compactación adicional las mezclas con IPL de 6.8	167
CUADRO N° 32. % de Va finales para valores de % de Va inicial del 4, 5 y 6 por efecto de la compactación adicional las mezclas con IPL de 7.2	170
CUADRO N° 33. % de Va finales para valores de % de Va inicial del 4, 5 y 6 por efecto de la compactación adicional las mezclas con IPL de 7.7.	173
CUADRO N° 34. % de Va finales para valores de Va inicial de 4% por efecto de la compactación adicional de las mezclas con los IPL de trabajo	179
CUADRO N° 35. % de Va finales para valores de Va inicial de 5% por efecto de la compactación adicional de las mezclas con los IPL de trabajo	180
CUADRO N° 36. % de Va finales para valores de Va inicial de 6% por efecto de la compactación adicional de las mezclas con los IPL de trabajo	180



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Curvas granulométricas de trabajo	192
ANEXO B. Ensayos de caracterización de agregados y ligante asfáltico	197
ANEXO C. Ensayos de gravedad máxima específica teórica (Gmm) de las mezclas trabajadas	226
ANEXO D. Ensayos de gravedad específica bulk (Gmb) a 25°C de los especímenes de trabajo	234
ANEXO E. Variación de alturas versus número de giros de las briquetas de ajuste a giros. (información arrojada por el SCG)	251
ANEXO F. Determinación del número de giros para una volumetría específica con base en las briquetas de ajuste a giros	270
ANEXO G. Grupos conformados de especímenes de trabajo para el acondicionamiento ambiental (temperaturas de servicio)	337
ANEXO H. Ensayos de gravedad específica bulk (Gmb) a 25°C de los especímenes de trabajo acondicionados a las temperaturas de servicio	349
ANEXO I. Cálculo de declives de compactación de las mezclas trabajadas	361



INTRODUCCIÓN

I. JUSTIFICACIÓN

La práctica actual del diseño de mezclas asfálticas deja ver la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que en gran medida el desempeño de esta durante la vida de servicio depende de las propiedades volumétricas. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en campo durante la construcción y evaluar la tendencia que tiene la mezclas a experimentar cambios volumétricos por efecto de la acción del tránsito, que denominaremos en este informe *“compactación adicional en condiciones de servicio”*, y de esta forma conocer las variables de mayor incidencia en la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a este proceso. La ponderación de las variables que inciden en la respuesta de la mezclas asfáltica frente al tránsito permitirá contar con criterios que desde la etapa de diseño de la mezclas, permite controlar efectivamente la tendencia al ahuellamiento que es una de las fallas más frecuente en los pavimentos en nuestro país.

En la construcción de capas asfálticas diseñadas para soportar un tránsito alto y en especial en lo referente al momento de la compactación de la mezcla, existe la práctica generalizada de dejar la capa con altos porcentajes de vacíos de aire (% Va), práctica apoyada en que algunas especificaciones para diseño y construcción establecen porcentajes de vacíos mayores en vías de tránsito alto, independiente de las particularidades de la mezcla y de las condiciones ambientales de servicio. Estos estándares son establecidos bajo la premisa que el tránsito en la etapa inicial de servicio le genera una compactación importante, independientemente de características como granulometría, tipo de ligante, condiciones ambientales de operación, espesor de película de asfalto, entre otros. En el caso de que no se cumpla lo citado anteriormente la mezcla asfáltica se vería seriamente afectada por las cargas y el régimen ambiental al que estaría sometida,



reduciendo así la durabilidad y estabilidad que proporcionan unas adecuadas características volumétricas. Además resulta importante resaltar que cualquier cambio volumétrico generado por el tránsito está concentrado en la zona de la huellas, perdiendo la capa homogeneidad tanto en la respuesta mecánica como en la vulnerabilidad a los agentes ambientales. Un criterio sano a tener en cuenta en el diseño de mezclas asfálticas es que una vez terminadas queden con la menor susceptibilidad al cambio volumétrico posible.

En este sentido los estándares de diseño y construcción de mezclas asfálticas en caliente para vías de tránsito alto en Colombia establecen un intervalo de vacíos de aire más alto en comparación con los datos para vías de tránsito medios y bajos, considerando bajo estas circunstancias que el tránsito le dará una compactación adicional significativa y proporcionalmente igual y a su vez independiente de las características de la mezcla y de las condiciones ambientales de trabajo. Algunas mezclas presentarán una compactación adicional diferente a la prevista por los estándares utilizados en el diseño, situación que conlleva en algunos casos a la construcción de capas con tendencia a las deformaciones tempranas que le restarán funcionalidad a la estructura.

II. ALCANCES

La investigación tendrá como finalidad establecer bajo unas condiciones específicas de: granulometrías; espesor de película de ligante; vacíos de aire iniciales y acondicionamiento de la mezcla y de las briquetas a las temperaturas de trabajo, la susceptibilidad de las mezclas asfálticas a cambios volumétricos generados por la compactación adicional en condiciones de servicio, con el fin de validar o refutar la premisa que existe al respecto, la cual indica que las mezclas asfálticas sometidas a altas repeticiones de carga, deben dejarse con un contenido de vacíos de aire relativamente alto con el fin de que el tránsito efectúe una compactación adicional, independiente de las características de las mezclas.



Este trabajo pretende:

- Resaltar la importancia de las relaciones volumétricas que se establecen en el diseño y construcción de las mezclas asfálticas en caliente, línea de investigación que viene adelantando el grupo de “Geotecnia Vial y Pavimentos” de la Universidad del Cauca.
- Encontrar correlaciones entre el contenido de vacíos de aire iniciales y finales, obtenidos después de la compactación adicional de las mezclas asfálticas en caliente analizadas.
- Encontrar correlaciones entre el índice de espesor de película de ligante, las relaciones volumétricas, las temperaturas de compactación y de servicio y la energía de compactación aplicada.
- Determinar la susceptibilidad a la compactación por el tránsito para mezclas asfálticas, con diferentes granulometrías.
- Determinar la susceptibilidad a la compactación por el tránsito para mezclas asfálticas, bajo tres diferentes temperaturas de trabajo.

El estudio de igual forma permitirá avanzar en temas de investigación relacionados con el comportamiento de diferentes concretos asfálticos, centrado en la evaluación del efecto del tránsito en la compactación de las mismas, considerando para ello técnicas muy conocidas como la desarrollada por la SHRP (Superpave), para la compactación y acondicionamiento de las mezclas, y por otro lado la implementación del método de Índice de Película de Ligante (IPL), técnica australiana retomada por el IDU y el INVIAS en sus especificaciones de construcción de carreteras y de normas de ensayo. El IPL en este estudio se utilizará como medio para establecer el porcentaje de ligante de las mezclas a ensayar.



También se busca además de la experimentación de laboratorio necesaria para cumplir con los objetivos del estudio, recopilar información bibliográfica, que permita a los lectores tener una visión completa sobre las mezclas asfálticas como material de construcción de pavimentos.

III. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la compactación adicional en condiciones de servicio en la volumetría de diferentes tipos de mezclas asfálticas en caliente y correlacionar la respuesta a dicha compactación con la trabajabilidad presentada por las mezclas durante el proceso de elaboración y compactación en condiciones de temperatura que se tendrán durante la construcción.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la susceptibilidad a la compactación adicional en condiciones de servicio para mezclas asfálticas en caliente, con diferentes condiciones de vacíos de aire iniciales.
 - Evaluar la trabajabilidad de las diferentes mezclas estudiadas, durante la elaboración y compactación de la mezcla en condiciones de temperatura durante la construcción. Entendiéndose la trabajabilidad como la respuesta a la compactación a las temperaturas adecuadas y la homogeneidad que presente la mezcla compactada.
 - Determinar la susceptibilidad a la compactación adicional en condiciones de servicio para mezclas asfálticas en caliente, con diferentes granulometrías.
-



- Determinar la susceptibilidad a la compactación adicional en condiciones de servicio para mezclas asfálticas en caliente, con diferentes cantidades de ligante (índices de película de ligante - IPL).
- Analizar la incidencia de la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}) en las mezclas asfálticas bajo diferentes gradaciones y contenidos de ligante (IPL).



Capítulo 1
MARCO TEÓRICO



1. MARCO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos son estructuras construidas por capas de diversos materiales seleccionados, superpuestas, colocadas y compactadas sobre la superficie del terreno. La estructura de un pavimento está concebida especialmente para la circulación del tránsito vehicular, por lo que es una solución económica y eficaz. A los pavimentos construidos con capas de rodadura en mezcla asfáltica se les conoce como pavimentos flexibles, en los que la superficie se apoya sobre una o más capas que ayudan a soportar las cargas y proporcionan una superficie de rodadura muy confortable para el usuario de la vía.

Teniendo en cuenta el objetivo de esta investigación, el marco teórico se desarrolla de tal forma que se cubran las definiciones, conceptos y variables que se consideran en su desarrollo. Primero se analiza la mezcla asfáltica con sus materiales constitutivos, segundo se expone las características volumétricas de las mezclas asfálticas que inciden en su comportamiento, tercero se consideran los factores que influyen en la variación del contenido de vacíos de aire (V_a) y en el ahuellamiento durante la vida en servicio, cuarto se contemplan normas de ensayo y las especificaciones de construcción en lo que respecta a los requerimientos de volumétricos para el diseño y por último se presenta la compactación giratoria en laboratorio dado que es el procedimiento seleccionado para evaluar la susceptibilidad de las mezclas estudiadas a la compactación adicional en condiciones ambientales de servicio.



1.2. LA MEZCLA ASFÁLTICA Y SUS MATERIALES CONSTITUTIVOS

Una mezcla asfáltica es una combinación íntima de agregados pétreos y ligante bituminoso, tal que cada partícula de agregado queda recubierta de una película de ligante, de manera que al compactarse se conforme una estructura resistente y con buena cohesión. La mezcla asfáltica es en caliente cuando los componentes se calientan previamente hasta temperatura de mezclado y la puesta en obra exige mantener la temperatura bastante mayor que la ambiente.



IMAGEN N° 1. Extendido de mezcla asfáltica

1.2.1. AGREGADOS PÉTREOS

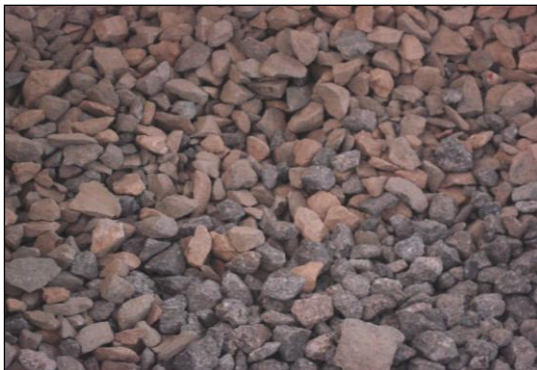


IMAGEN N° 2. Agregados pétreos.

Los agregados constituyen normalmente entre el 94 y el 96% en peso de la mezcla. Sus propiedades y características son factores que afectan de una manera importante las propiedades de la mezcla resultante, conforman la estructura de la mezcla asfáltica. En particular cambios en el agregado afectan directamente el contenido de vacíos de aire (V_a) y los vacíos en el agregado mineral (VAM).

Se clasifican de acuerdo al tipo de formación de cada roca en: sedimentarios, ígneos y metamórficos. Los agregados usados en las mezclas asfálticas se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados, y agregados sintéticos o artificiales.



El manejo mínimo del agregado para mezclas asfálticas en caliente incluye apartarlo de las reservas para que pueda ser procesado adicionalmente con el fin de que reúna los requerimientos de calidad y luego ser mezclado en la planta de mezcla en caliente.

Los procedimientos de control de calidad requieren de pruebas durante los procesos de producción, acopio y manejo, para asegurar que solamente se use material satisfactorio en la mezcla de pavimentación y proporcionar un registro permanente como evidencia de que los materiales cumplen con las especificaciones de la obra. Es muy importante, tener entonces, técnicas apropiadas de muestreo que permitan determinar con base en muestras representativas resultados confiables de los ensayos.

1.2.1.1. PROPIEDADES

La calidad del agregado usado es un factor crítico en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Sin embargo, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aun más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado en una mezcla asfáltica de buena calidad. Estas propiedades son: gradación y tamaño máximo del agregado, textura de la superficie, porosidad, afinidad con el asfalto, limpieza, dureza, y forma y resistencia de las partículas.

1.2.1.1.1. GRADACION Y TAMAÑO MAXIMO

Todas las especificaciones de pavimentos asfálticos de mezclas en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones.



IMAGEN N° 3. Tamizado por vía húmeda.

Los diferentes tamaños son tamizados para determinar la distribución de tamaños de cada tipo de agregados. Debe siempre realizarse el tamizado por vía húmeda para asegurarse que todo el material fino que se encuentra adherido a los granos más gruesos se remueve de éstos y son efectivamente tomados en cuenta en su verdadero tamaño.

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado. Existen dos formas de designar tamaños máximos de partículas:

- *Tamaño máximo nominal de partícula (TMN)*, según INVIAS (INV E-201-07) es el tamiz de mayor abertura sobre el cual se permite que se retenga algo de material. En sistemas de diseño como el SUPERPAVE, será el tamaño del tamiz de mayor abertura donde se retenga el diez por ciento o más.
- *Tamaño máximo de partícula (TM)*, designado por INVIAS (INV E-213-07), como la abertura del menor tamiz de la serie o de menor abertura por el que pasa todo el material (100%) o el tamiz más grande que el designado para el tamaño máximo nominal.



Las mezclas asfálticas son clasificadas de acuerdo a la granulometría del agregado pétreo y el TM. Se clasifican como densas, (MDC-1, MDC-2, y MDC-3), semi-densas, (MSC-1, y MSC-2), gruesas, (MGC-0 y MGC-1) y de alto modulo, (MAM).



IMAGEN N° 4. Agregado grueso (retiene N° 4)



IMAGEN N° 5. Agregado fino (pasa N° 4).

La granulometría de la fracción “pasa 200” o polvo mineral, aunque generalmente no se controla de una forma directa, tiene un importante efecto en las propiedades volumétricas de la mezcla. Mientras más fino sea este, se requerirá una mayor cantidad de ligante, pues se tiene que recubrir con asfalto una mayor área superficial. Si el “pasa 200” es extremadamente fino, por otra parte, aunque su cantidad en peso sea igual, este puede actuar como un “extendedor de asfalto” y la mezcla se comportará igual que si se le hubiese incorporado una cantidad extra de ligante.

El INVIAS en sus especificaciones de construcción de carreteras y de normas de ensayo, controlan de forma indirecta la finura del llenante, con ensayos como el de densidad aparente del llenante mineral en tolueno, y el de porcentaje de vacíos del llenante compactado en seco.



IMAGEN N° 6. Ensayo de densidad aparente en Tolueno



La granulometría del agregado después de ser calculada se dibuja como una curva continua.

Dos tipos de curvas que generalmente se usan son:

- *Curvas de gráficos semilogarítmicos* (ver figura N° 1) y
- *Curvas de gráficos exponenciales* (ver figura N° 2).

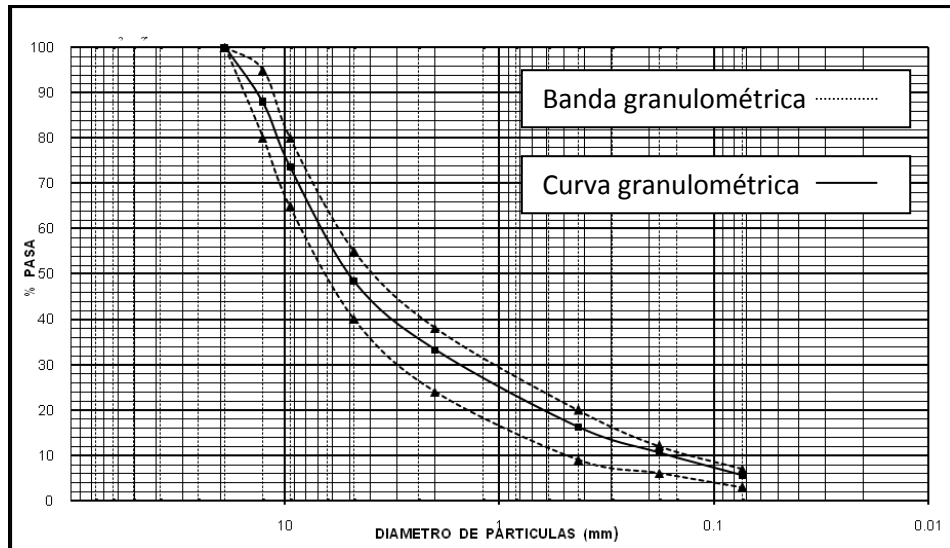


FIGURA N° 1. Curva de gradación en un gráfico semilogarítmico.

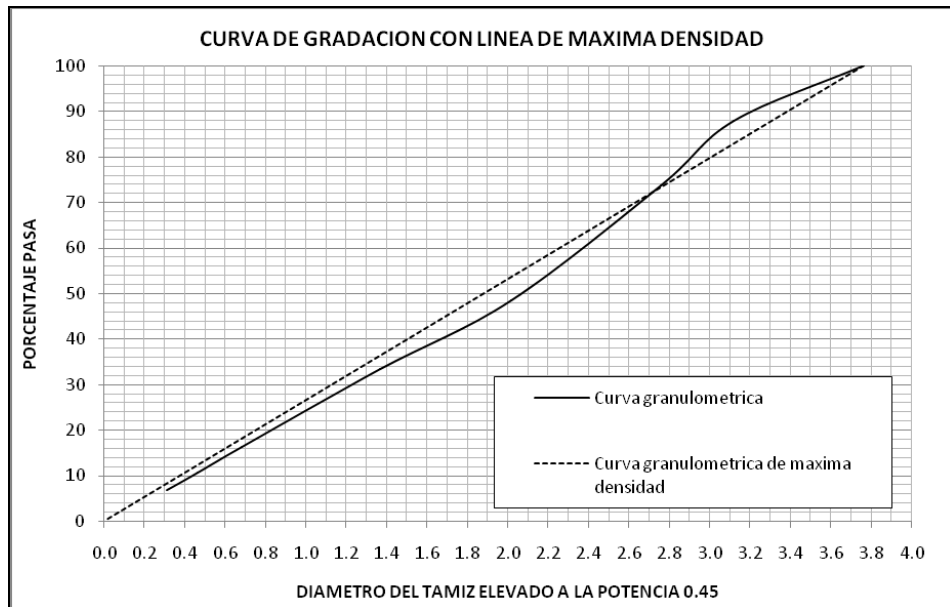


FIGURA N° 2. Curva de gradación en un gráfico de potencia 0.45



El análisis granulométrico del agregado, y la combinación de agregados para obtener la gradación deseada, son pasos importantes en el diseño de la mezcla. La gradación del agregado debe satisfacer los requisitos impuestos por las especificaciones del proyecto y debe producir un diseño de mezcla que cumpla con los criterios descritos en el método de diseño.

1.2.1.1.2. TEXTURA SUPERFICIAL

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina, no solo la trabajabilidad y resistencia final de las mezclas asfálticas, sino también las características de resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento. La textura superficial puede definirse como los accidentes geométricos presentes a lo largo de la superficie de las partículas.

La textura superficial es más importante que la forma de la partícula. Una textura áspera, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas respecto a otras porque desarrollan mayor ángulo de fricción interna y a la vez provee un coeficiente de fricción superficial que hace que aumente la resistencia al deslizamiento y el movimiento del tránsito sea más seguro.

Adicionalmente, las películas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas. Las gravas naturales son frecuentemente trituradas durante su procesamiento, debido a que generalmente contienen superficies lisas. La trituración produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula. No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es una propiedad que se evalúa en las arenas de forma combinada con la angularidad mediante la prueba de porcentaje de vacíos no compactados. Es una característica, que al igual que la forma de la partícula, incide en la resistencia de la mezcla y en la trabajabilidad que exhiba durante la construcción.



1.2.1.1.3. POROSIDAD

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de agua que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad. La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces absorberá asfalto durante mezclado en la planta, y durante todo el tiempo que conserve la viscosidad adecuada para el mezclado dejando así menos asfalto efectivo en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Un diseño de mezcla adecuado debe prever esta situación y proporcionar el asfalto suficiente para que los agregados queden cubiertos y con la película de asfalto adecuada. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades mayores de asfalto que un agregado menos poroso para una misma granulometría.

Los agregados altamente porosos y absorbentes no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos. Estos materiales son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

Aun cuando la cantidad de agua que es absorbida dentro de los poros del agregado puede ser determinada de manera sencilla con bastante precisión, no sucede lo mismo con la absorción de asfalto, dado que es un proceso complejo en el que intervienen más variables. La cantidad absorbida de asfalto depende, entre otras cosas, de: la viscosidad del asfalto, de la temperatura del agregado en el momento de mezcla, de la porosidad del agregado y del lapso que el ligante dure caliente y conserve la baja viscosidad que se requiere para penetrar en los poros permeables de las partículas. Si se manejan cuidadosamente la temperatura de mezclado y se conoce el tiempo que la mezcla va a durar caliente, se puede estimar en el laboratorio con bastante aproximación la absorción real de asfalto de un agregado con una determinada granulometría.



Con el fin de acercar la “MEZCLA DE DISEÑO” a la verdadera “MEZCLA EN PLANTA” la mezcla ya preparada en el laboratorio se deja, antes de ser compactada, en un horno ventilado y termostáticamente controlado a temperatura de 135°C, por un lapso de tiempo de 2 horas, condiciones que permite simular la absorción de asfalto en los agregados en obra durante los tiempos de almacenamiento y/o transporte.

1.2.1.1.4. AFINIDAD POR EL ASFALTO

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto con el fin de evitar deslizamientos relativamente altos entre las partículas, que deformen las capas asfálticas o eviten el desprendimiento de los fragmentos de roca que componen el esqueleto mineral de las mezclas asfálticas. En general la afinidad en términos de adherencia depende de: de la composición química, de la forma, de la rugosidad, de la limpieza del agregado y del tipo y cantidad de ligante asfáltico.

Los agregados de origen calcáreo como las calizas, dolomitas tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua), dado que conservan la adherencia con el asfalto bajo la acción del agua. La Cuarcita y otros agregados silíceos no tienen buena afinidad con el asfalto y se conocen como hidrófilos (atraen el agua).

1.2.1.1.5. GRAVEDAD ESPECÍFICA

La gravedad específica de un agregado es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. La gravedad específica es una forma de expresar las características de peso y volumen de los materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas de pavimentación debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso. Otra razón importante por la cual es necesario conocer la gravedad específica de los agregados usados es que este ayuda en el cálculo del porcentaje de vacíos de aire de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación



deben incluir un cierto porcentaje (en volumen) de vacíos o espacios de aire; estos espacios desempeñan una labor importante en el pavimento terminado.

Se han definido cuatro tipos de gravedad específica, dependiendo del volumen considerado, incluyendo o sin incluir el volumen de los poros permeables. Algunos de ellas se requieren en mezclas asfálticas para encontrar asfalto absorbido y las relaciones volumétricas de las mezclas (ver figura N° 3).

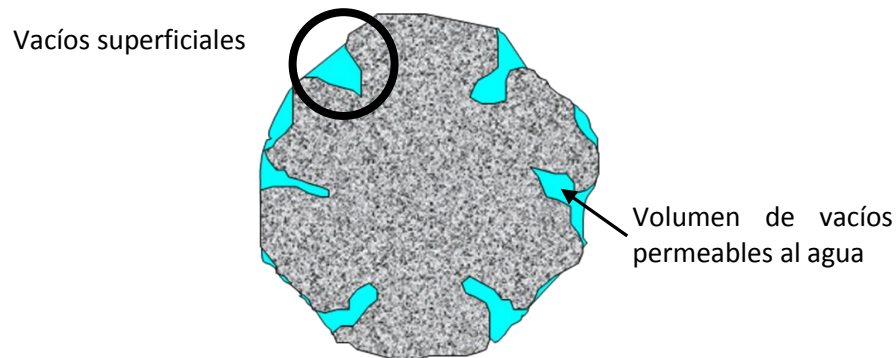


FIGURA N° 3. Poros permeables en una partícula de agregado.

- *Gravedad específica aparente (G_{sa})*, no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros que se llenarían de agua al mojar la partícula, V_s .
- *Gravedad específica bulk (G_{sb})*, incluye en el volumen todos los poros de la partícula, V_{sb} .
- *Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca ($G_{sb_{sss}}$)*, incluye el peso del agua que llena los poros permeables de la partícula luego de inmersión.
- *Gravedad específica efectiva (G_{se})*, incluye el volumen de sólidos más el volumen de los poros permeables no llenos de asfalto, V_{se} (ver figura N° 4).

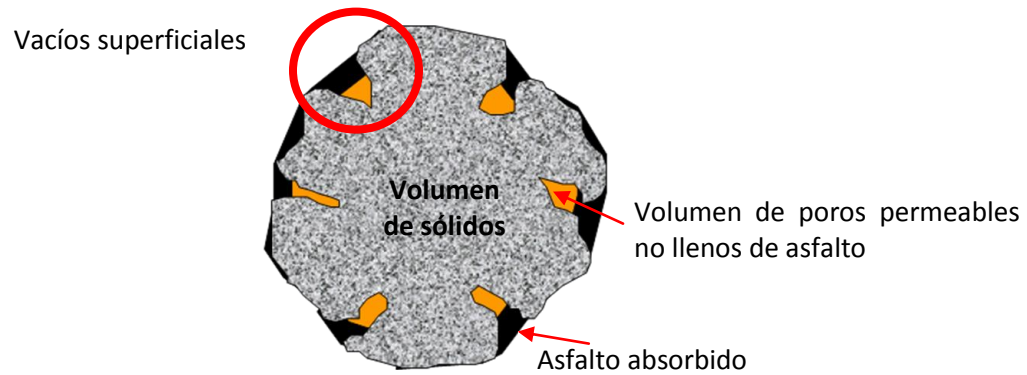


FIGURA N° 4. Ilustración del volumen V_{se} , volumen de sólidos más volumen de los poros no llenos de asfalto.

1.2.1.1.6. LIMPIEZA

Las especificaciones de la obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla, partículas blandas, etc) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales afectan desfavorablemente el comportamiento de la mezcla asfáltica



IMAGEN N° 7. Ensayo de equivalente de arena



IMAGEN N° 8. Ensayo de azul de metileno

La limpieza del agregado puede determinarse, a través de un tamizado por lavado, proporcionando una medida exacta del porcentaje de material más fino que 0.075 mm (N° 200), si



este se acompaña con la determinación del índice de plasticidad o el valor de azul, se investiga también la nocividad de los finos presentes. El ensayo de equivalente de arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4).

1.2.1.1.7. RESISTENCIA DE LAS PARTÍCULAS



IMAGEN N° 9. Máquina de los Ángeles



IMAGEN N° 10. Ensayo de sanidad o solidos de agregados

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión (desgaste irreversible) y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla asfáltica y durante la vida en servicio del pavimento. Los agregados que están en la superficie de rodadura, o cerca de, la superficie, deben ser más duros (tener más resistencia), que los agregados usados en las capas inferiores de las capas del pavimento. Esto se debe a que las capas superficiales reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por las cargas del tránsito.

El ensayo de desgaste en la Máquina de los Ángeles mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión y el ensayo de solidez o sanidad mide la resistencia del agregado al



IMAGEN N° 11. Micro-Deval



deterioro o desintegración bajo la acción del clima. Actualmente se está manejando también, la prueba de desgaste Micro Deval que analiza de forma semejante al ensayo en la Máquina de los Ángeles la resistencia al desgaste/abrazión y durabilidad/solidez del agregado sujeto a la abrazión y a la acción de desintegración con el medio ambiente, en condición húmeda o seca.

1.2.1.1.8. FORMA DE LAS PARTÍCULAS

La forma de las partículas de los agregados afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de energía necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.



IMAGEN N° 12. Agregados triturados



IMAGEN N° 13. Agregados de río

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento se da generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cubica, producidas, casi siempre por trituración.



Las mezclas asfálticas se elaboran con agregados procesados, deben tener un alto porcentaje de partículas angulares y se permite presentar una baja proporción de redondeadas. El agregado proporciona la estructura a la mezcla asfáltica, las partículas gruesas aportan importante resistencia por lo que resulta ideal que sean producto de la trituración. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y generalmente son de trituración combinadas con arenas naturales. Actualmente se están exigiendo cierto grado de angularidad en los agregados finos lo que lleva a disminuir la participación de las arenas redondeadas en la elaboración de mezclas asfálticas.

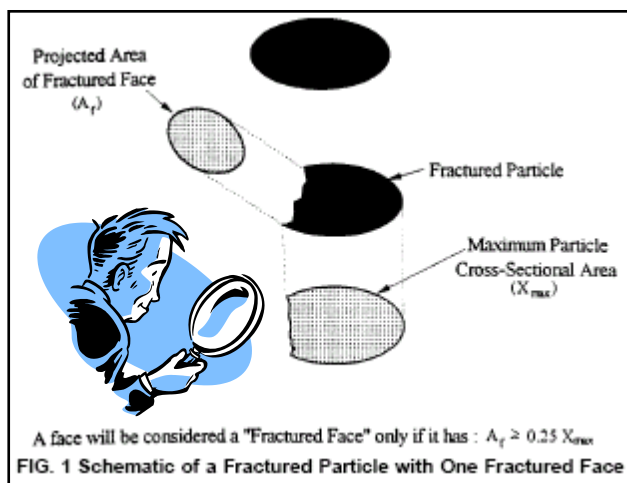


FIGURA N° 5. Ensayo de angularidad de agregado grueso

Fuente: Norma INV E-227-07

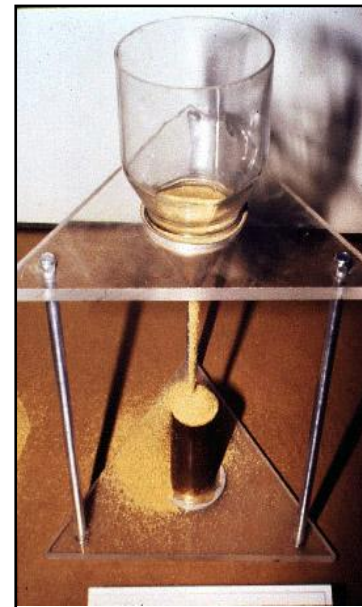


IMAGEN N° 14. Ensayo de angularidad de agregado fino.

Una mezcla con mayor proporción de agregados triturados (gruesos y finos), no será tan fácil de compactar como la “misma mezcla” con mayor contenido de agregado natural. Para el mismo esfuerzo de compactación en laboratorio, la mezcla con mayor contenido de agregado triturado, resultará en un mayor valor de vacíos de aire (V_a) que la mezcla elaborada con agregado redondeado.



**IMAGEN N° 15. Ensayo de índice
de alargamiento**



**IMAGEN N° 16. Ensayo de índice
de aplanamiento**



**IMAGEN N° 17. Ensayo de partículas de agregado alargadas,
aplanadas y alargadas y aplanadas.**

Los ensayos de angularidad, de índices de alargamiento y aplanamiento, y el ensayo de partículas alargadas, aplanadas y alargadas y aplanadas de agregados describen los procedimientos necesarios para medir estas propiedades.

1.2.2. LIGANTE ASFÁLTICO

Se denomina asfalto a determinadas sustancias bituminosas de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono en su mayor parte y procedentes de yacimientos naturales u obtenidos como residuo del tratamiento de crudos de petróleos de destilación o extracción. Estos últimos representan más del 90% de la producción total de asfaltos.



**IMAGEN N° 18. Cemento
asfáltico**



1.2.2.1. COMPOSICION QUÍMICA

Al referirse al asfalto es necesario tener presente que bajo esta denominación se pueden encontrar materiales de características y composición muy variable, con orígenes muy remotos en el tiempo y de diversos reinos, vegetal y animal. Es entonces necesario tener un amplio conocimiento de la constitución química de los asfaltos ya que brinda una gran ayuda para poder controlar las propiedades químicas y físicas de los mismos, lo cual permite adecuarlo a la función que va a desarrollar en la vía.

Todos los asfaltos tienen una combinación de elementos químicos básicamente similar, aproximadamente 84% de Carbono, 10.2% de Hidrógeno y 0.6% de Nitrógeno a lo que se agregan otros elementos en mínimas proporciones. Lo que produce las diferencias entre los distintos componentes es la forma en que los átomos de Carbono se unen entre sí para formar las moléculas. Al igual que el petróleo crudo, es una mezcla de numerosos hidrocarburos, mezclados en proporciones muy diferentes.

“La mayoría de estos hidrocarburos están presentes en el petróleo crudo, pero el proceso de refinación da también lugar a cambios en su estructura molecular. Como los hidrocarburos livianos se eliminan durante ese proceso, la gran mayoría de los hidrocarburos que quedan en los asfaltos son pesados y de molécula complicada. Los hidrocarburos constituyentes de los asfaltos, pueden pertenecer a uno o varios de los siguientes grupos:

- *Alifáticos saturados o parafinicos.*
- *Nafténicos o ciloparafinicos.*
- *Aromáticos.*
- *Alifáticos no saturados”.¹*

¹ Arenas L. Hugo L., Tecnología del Cemento Asfáltico. Editorial FAID. 2ed. 2000.p. 88



La química del asfalto es, muy seguramente, la parte más compleja de la industria petrolera, porque se trata de una mezcla de diferentes tipos de materiales con diferentes masas moleculares. La investigación en este sentido es también compleja, pues se trata de correlacionar la composición química con las propiedades físicas y su comportamiento en servicio.

“En términos ingenieriles se divide el asfalto en tres fracciones: oleosas, resinas y asfáltenos; siendo esta última la que tiene mayor incidencia en las propiedades viales de los asfaltos, debido a su baja solubilidad en los otros componentes. La relación proporcional existente entre ellas produce comportamientos diferentes, el comportamiento vial más deseado se obtiene cuando la relación entre las tres fracciones mantiene en equilibrio un estado de solución coloidal y consecuentemente un comportamiento de flujo Newtoniano”.²

Las mezclas asfálticas sufren cambios significativos desde que se fabrican y durante la vida en servicio, esto se debe principalmente a las propiedades de los ligantes asfálticos, algunos de estos materiales tienen alta susceptibilidad al envejecimiento. El proceso de envejecimiento de los asfaltos ocurre en tres etapas, en principio al elaborarse las mezclas en caliente, cuando se encuentra en condición de película delgada a temperaturas de 145 hasta 180°C, en segundo lugar durante el proceso de extendido y densificación de la capa, periodo en el que los materiales se encuentren a temperaturas superiores a 120°C y con exposición de grandes superficies al aire y luego finalmente durante su vida de servicio, como consecuencia de su exposición a los factores ambientales y a la acción de los esfuerzos producidos por el tránsito.

“Los rayos ultravioletas de la luz solar, los ciclos de temperatura, la humedad ambiente y la acción del oxígeno contenido en el aire son agentes agresivos para la composición química de los asfaltos. Todos los compuestos constitutivos sufren igualmente este proceso, aunque en distinta magnitud, son aquellos que poseen moléculas de hidrógeno u otros elementos en posiciones en las que su vínculo es débil, donde se produce la oxidación de esa molécula reduciéndose de esa manera el porcentaje de aromáticos y de resinas, incrementándose la fracción relativa de asfáltenos, los que merced a su baja solubilidad producen la pérdida del estado de solución coloidal tendiendo al

² Bustos Eduardo., Curso Reciclaje de Pavimentos Flexibles. Universidad del Cauca. 1998



estado gel, en este estado se manifiesta el fenómeno de comportamiento tixotrópico. La pérdida de estado de solución coloidal se percibe como un endurecimiento, (o rigidización – stiffness) del asfalto, con pérdida o disminución de sus propiedades ingenieriles”.³

La durabilidad de la capas asfálticas está íntimamente asociada al proceso de oxidación de los asfaltos que a su vez depende de la susceptibilidad al envejecimiento y al grado de exposición que tengan al oxígeno y a los rayos ultravioleta, se han estudiado los diferentes factores que inciden en el proceso, buscando controlar y reducir su efecto.

La interacción entre inertes, (especialmente las fracciones finas del agregado) y asfalto en un concreto asfáltico es determinante en el comportamiento mecánico de la estructura, así como de la capacidad del ligante de conservar adecuada respuesta elástica y cohesiva, ante variadas condiciones ambientales. En este sentido se tienen importantes avances, se han desarrollado tecnologías que incorporan sustancias y aditivos que mejoran el comportamiento de los asfaltos, como los diferentes polímeros, los aditivos mejoradores de adherencia, y los productos que pueden devolver a los asfaltos envejecidos sus propiedades iniciales (agentes rejuvenecedores).

Los componentes del asfalto se han clasificado en dos grupos: las asfaltenos, formando las mezclas y los máltenos, característicos de la fase continua. Un asfalto de buena calidad requiere que sus componentes químicos estén en una relación que garantice su estabilidad una vez se encuentre en servicio. La separación de las distintas fracciones que componen un asfalto, puede ser realizada según varios métodos, entre ellos el desarrollado por F.S.Rostler y H.W.Sternberg ofrece una descomposición por precipitación de las fracciones que mayor incidencia tienen en el comportamiento vial del asfalto.

Arenas L. Hugo L., cita:

Los asfaltenos contienen las moléculas más pesadas del asfalto con un carácter aromático muy marcado, presentándose un descenso de esta característica en la serie de resinas y aceites. Los asfaltenos son los responsables de la dureza de los

³ Ibid



asfaltos. Las resinas le proporcionan sus características cementantes o aglutinantes, mientras que los aceites la consistencia necesaria para hacerlos trabajables. Los asfáltenos son intrínsecamente muy adherentes, pero al estar rodeados por una cortina de resinas no intervienen directamente en la adherencia con los materiales pétreos. Su presencia es fundamental en las propiedades mecánicas del asfalto, pues el alto poder de adsorción de las resinas, proporciona a su núcleo una alta rigidez.

Las propiedades físicas del asfalto dependen de las proporciones de asfáltenos, resinas y aceites que contiene. Un asfalto con un alto contenido de aceites, se comportara como un fluido viscoso. Cuando el asfalto es sometido a los efectos del calentamiento en la planta, se va presentando una reducción gradual de los aceites, hay un acercamiento entre los núcleos de los asfáltenos y la fricción originada hace que el asfalto incremente su viscosidad. Como se puede observar, es muy importante la proporción en que intervienen cada uno de estos componentes en la consistencia del asfalto. En los cementos asfálticos normales hay un predominio de los asfáltenos y las resinas, ante un bajo contenido de los aceites. También, mediante un proceso de oxidación, se pueden modificar las cantidades de estos componentes en el asfalto. Mediante este fenómeno, los aceites se convierten en resinas y estas en asfáltenos. Los aceites protegen al asfalto de la oxidación debido a su gran estabilidad química, lo cual hace concluir que un asfalto que tenga altos contenidos de aceites será más resistente al envejecimiento y más durable, pero será igualmente muy deformable a temperaturas ordinarias, es necesario entonces que exista un equilibrio en esta composición, siendo lo ideal un asfalto poco deformable y durable o poco sensible al envejecimiento⁴.

1.2.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

⁴ Arenas .L. Hugo. L., Tecnología del Cemento Asfáltico. Editorial FAID. 2ed. 2000.p. 95-96



1.2.2.2.1. DURABILIDAD



IMAGEN N° 19. Película delgada RTFO

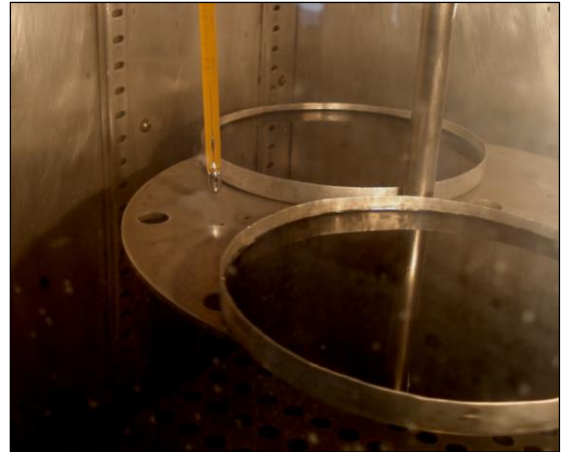


IMAGEN N° 20. Película delgada TFO

Durabilidad, es la medida de la capacidad que tiene un asfalto para mantener sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. El envejecimiento no depende únicamente de las propiedades del asfalto, dado que las propiedades volumétricas establecen el grado de exposición de asfalto al oxígeno del aire y de agua y a los rayos ultravioletas. Por lo tanto el comportamiento de la mezcla depende, además, de las propiedades de los materiales constitutivos del diseño de la mezcla y del proceso constructivo que debe cuidar que se dosifique adecuadamente, que el asfalto no se envejezca más de lo estimado durante la elaboración de la mezclas y que la compactación garantice las características volumétricas establecidas en el diseño de la mezcla. Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto. Estas son la prueba de película delgada en horno (TFO) y la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO). Ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto.



1.2.2.2.1.1. ENDURECIMIENTO Y ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. La figura N° 6 muestra el aumento en viscosidad debido al calentamiento de una película delgada de asfalto. El rango de viscosidad del material original (antes de la prueba de película delgada en horno rotatorio-RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si en el pavimento terminado, se mantiene una cantidad pequeña de vacíos de aire interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado.

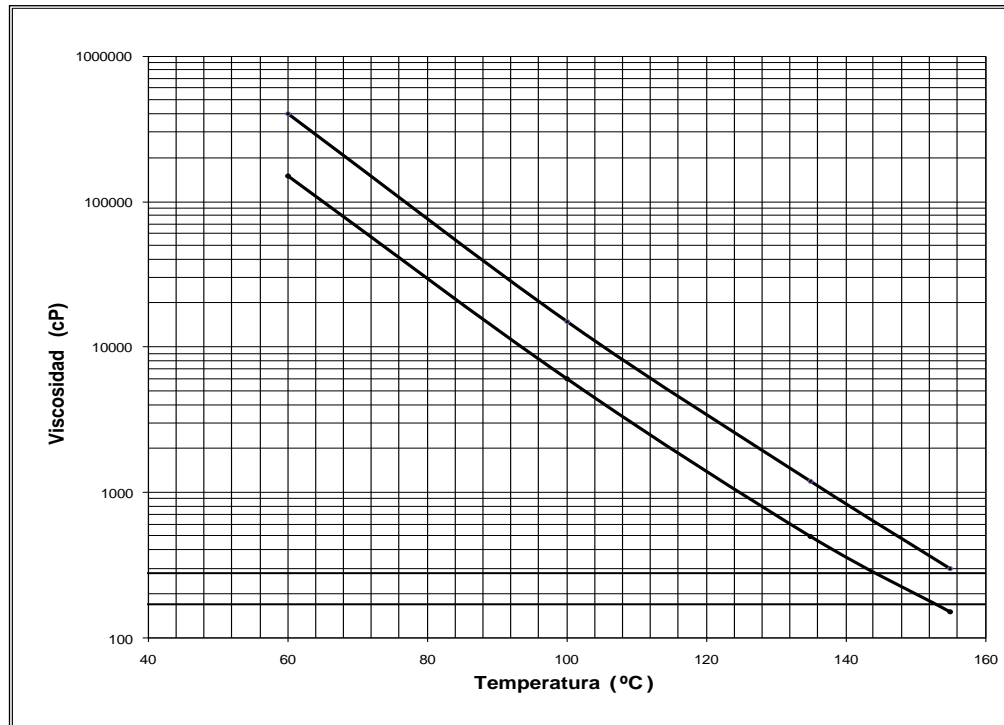


FIGURA N° 6. Curva de susceptibilidad térmica (reológica) del asfalto

1.2.2.2.2. ADHESIÓN Y COHESIÓN

La adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación y la cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado. La adherencia es un fenómeno complejo en el que intervienen tanto las propiedades de los dos materiales como las condiciones en el momento del mezclado

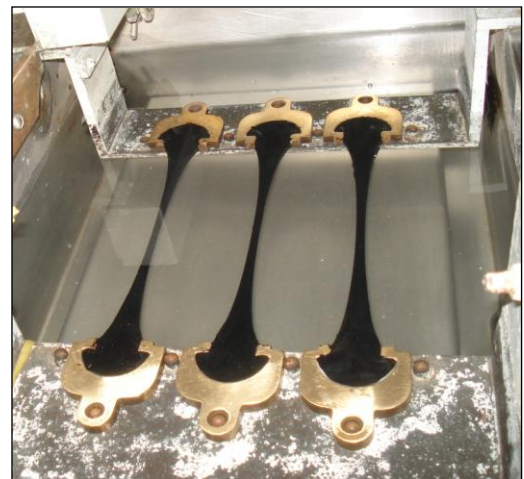


IMAGEN N° 21. Ensayo de ductilidad



“El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos como la relación con la adhesión y la cohesión. En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica - no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos”.⁵

1.2.2.2.3. SUSCEPTIBILIDAD A LA TEMPERATURA

“Todos los asfalto son termoplásticos, esto es, se vuelven más duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta caracterización se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia”.⁶

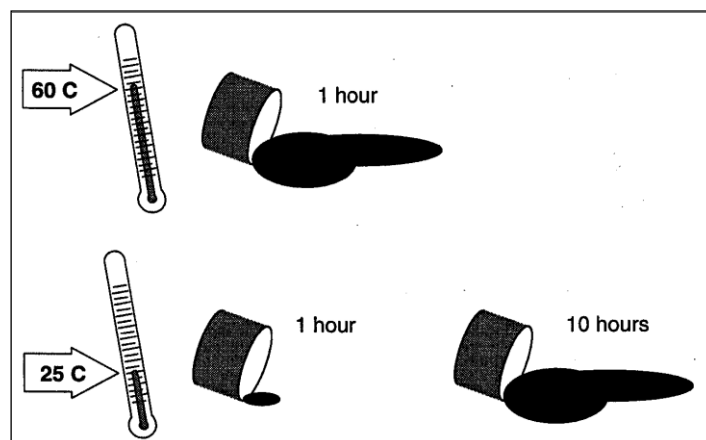


FIGURA N° 7. Dependencia tiempo – temperatura del cemento asfáltico

Fuente: Asphalt Institute

La susceptibilidad térmica, puede verse como una ventaja o desventaja, esto es que sus principales propiedades dependen directamente de la temperatura y es por esto que casi todos los ensayos de caracterización de asfaltos y mezclas asfálticas deben especificar temperatura. El comportamiento del asfalto depende también del tiempo de aplicación de la carga. “para una

⁵ Asphalt Institute. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en Caliente. Serie de Manuales No 22. 1992. p.18

⁶ Ibid., p.18



misma carga y un mismo asfalto, diferentes tiempos de aplicación de la carga implican propiedades diferentes, es decir una baja velocidad de carga se puede simular con temperaturas elevadas y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas”.⁷

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la capa de base de la estructura de pavimento.



IMAGEN N° 22. Ensayo de viscosidad



IMAGEN N° 23. Ensayo de penetración

La propiedad del asfalto de susceptibilidad a temperatura es utilizada para fabricar las mezclas asfálticas en caliente. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales, para mantener unidas las partículas de agregado.

En términos generales, las pruebas necesarias para determinar y medir las propiedades físicas son las siguientes: viscosidad, penetración, punto de inflamación, película delgada (TFO), película

⁷ Asphalt Institute, antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE



delgada en horno rotatorio (RTFO), ductilidad, solubilidad y peso específico. Las normas de ensayo del INV (Instituto Nacional de Vías), describen en detalle el equipo y los procedimientos relacionados con cada determinación.

1.3 VOLUMETRÍA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EN CALIENTE

Las características volumétricas de la mezcla afectan directamente el comportamiento mecánico en servicio y la durabilidad entendido como la capacidad de mantener las propiedades en el tiempo. Por esta razón el cuidado de las propiedades volumétricas resulta fundamental en la etapa de diseño de la mezcla, cuando se está seleccionando la fórmula de trabajo se debe cuidar tanto las condiciones iniciales como la capacidad de la mezcla para mantenerlas en el tiempo de servicio cuando esta sometida al tránsito en las condiciones ambientales del proyecto. Durante el proceso constructivo se debe garantizar que la mezcla realmente quede con las condiciones volumétricas iniciales establecidas en el diseño.

La norma INV E-799-07 proporciona los procedimientos para llevar a cabo el análisis volumétrico de especímenes de mezcla asfáltica en caliente (MAC) y presenta los métodos para determinar en especímenes de MAC las siguientes características volumétricas:

- *El porcentaje de volumen de vacíos de aire (V_a), también se utiliza el término “contenido de vacíos de aire”;*
 - *El porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM);*
 - *Vacíos llenos de asfalto (VFA);*
 - *Volumen efectivo de ligante asfáltico (V_{be}); y*
 - *Contenido de asfalto efectivo, expresado en porcentaje de la masa de la mezcla (P_{be}).*
-



- Relación de polvo, llenante- asfalto efectivo, ($P_{0.075} / P_b e$).

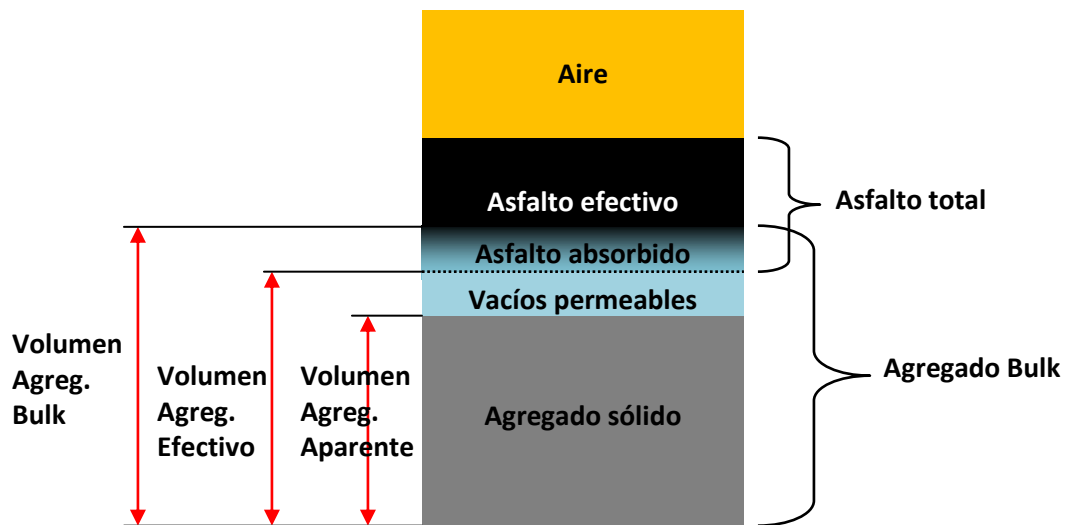


FIGURA N° 8. Diagrama de fases

Los valores de estas propiedades son calculadas a partir de medidas de las gravedades específicas de los materiales constitutivos, (ligante, agregado grueso, agregado fino y del llenante), de la MAC compactada y sin compactar y además, de las proporciones de los materiales constitutivos en la formula de trabajo de MAC.

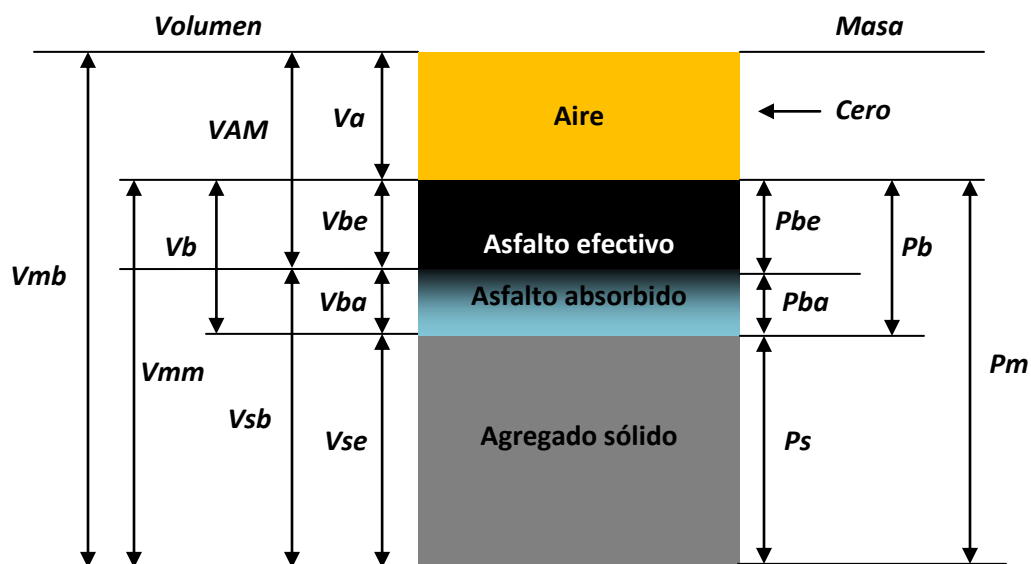


FIGURA N° 9. Diagrama de fases (volúmenes y masas considerados en el análisis volumétrico).



- *Los vacíos de aire (V_a)*, son las bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto, en una mezcla asfáltica compactada. Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen.

Se calcula el porcentaje de vacíos de aire, V_a , en la MAC compactada, con la siguiente expresión:

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

G_{mm} : Gravedad específica máxima teórica, y

G_{mb} : Gravedad específica bulk.

- *Los vacíos en el agregado mineral (VAM)*, es el volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una MAC compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo). Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen

Se calcula el porcentaje de vacíos entre las partículas del agregado mineral (VAM), con la siguiente expresión:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica bulk del agregado combinado, y

P_s : porcentaje de agregado respecto al peso total de la mezcla (INV E-730-07 ó 731-07)



$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}}$$

Donde:

P₁, P₂ y P₃: Porcentaje de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral respectivamente, respecto al peso total del agregado, y

G₁, G₂ y G₃: Gravedad específica del agregado grueso (INV E-233-07), agregado fino (INV E-222.07) y llenante mineral (INV E-128-07) respectivamente.

- *El contenido efectivo de asfalto (P_{be})*, es el contenido total de asfalto menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado. Se expresa como porcentaje del peso de la mezcla de pavimento compactada.

Se calcula el contenido de asfalto efectivo, P_{be}, como porcentaje del peso de la MAC, con la siguiente expresión:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} \times P_s}{100}$$

Donde:

P_b: Porcentaje de ligante asfáltico, y

P_{ba}: Porcentaje de asfalto absorbido

$$P_{ba} = \frac{G_b \times (G_{se} - G_{sb})}{G_{sb} \times G_{se}} \times 100$$



Donde:

G_b: Gravedad específica del ligante asfáltico (INV E-707-07),

G_{se}: Gravedad específica efectiva del agregado.

La *Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se})*, es la relación entre la masa en estado seco (o el peso seco en el aire-P_s) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables no llenos de asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua (V_{se}), ambos a la misma temperatura establecida. Su valor es adimensional.

Se calcula la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), con la siguiente expresión:

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

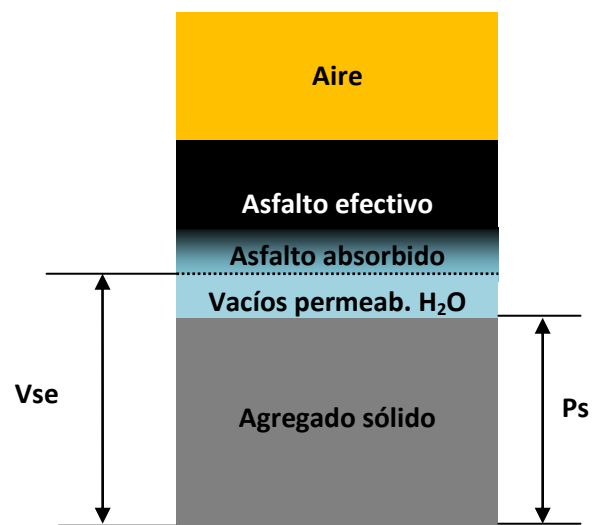


FIGURA N° 10. Diagrama de fases para G_{se}

- *Los vacíos llenos de asfalto (VFA)*, son la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VAM. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla.

Se calcula el porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico (VFA) como una porción de los vacíos en el agregado mineral, con la siguiente expresión:

$$VFA = \frac{VAM - Va}{VAM} \times 100$$



- *El volumen de asfalto absorbido (Vba)*, es el volumen de ligante asfáltico en una MAC que ha sido absorbido en los poros de las partículas de agregados. El Vba es un volumen de ligante asfáltico en la MAC que permite calcular el contenido de asfalto efectivo.
- *La relación de polvo ó relación llenante efectivo, (P_{0.075} / Pbe)*, es la relación en masa, entre el porcentaje de agregado que pasa el tamiz de 0.075 mm (No 200), P_{0.075}, y el contenido de asfalto efectivo (Pbe).

Se calcula la relación de polvo, relación entre el llenante y el asfalto efectivo, con la siguiente expresión:

$$R.P. = \frac{P_{0.075}}{Pbe}$$

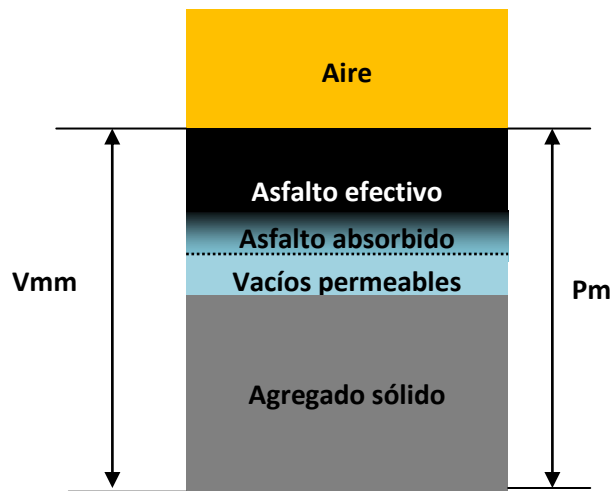
Donde:

P_{0.075}: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz de 0.075 mm (N° 200)

- *Gravedad máxima teórica a 25°C, Gmm*, es la relación entre la masa (o peso seco en el aire- Pm) de un volumen de mezcla sin compactar (sin tener en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas cubiertas de asfalto, Va = 0) y la masa de un volumen igual de agua (Vmm) a una temperatura establecida, en este caso a 25°C. Su valor es adimensional.

Se calcula la gravedad máxima teórica (Gmm) de la mezcla sin compactar con la siguiente expresión:

$$Gmm_{a 25^{\circ}C} = \frac{A}{A + D - E}$$



Donde:

- A: Masa en el aire de la muestra seca al horno, g
- D: Masa del recipiente lleno con agua a 25°C, g, y
- E: Masa del recipiente lleno con agua y muestra a 25°C, g.

FIGURA N° 11. Diagrama de fases para Gmm

- *Gravedad específica bulk a 25°C*, G_{mb} , es la relación entre la masa (peso en el aire- P_m) de un volumen dado de material (mezcla compactada) a una determinada temperatura, generalmente a 25°C para mezclas asfálticas, y la masa de un volumen igual de agua destilada (V_{mb}), libre de gas, a la misma temperatura. Su valor es adimensional.

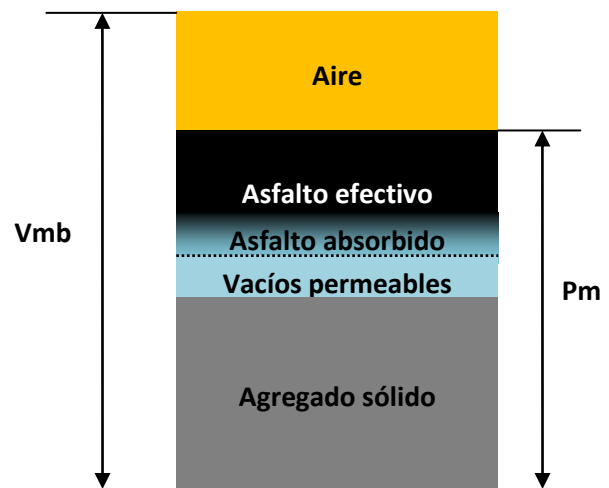


FIGURA N° 12. Diagrama de fases para Gmb

Se calcula la gravedad específica bulk (G_{mb}) del espécimen con la siguiente expresión:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$



Donde:

- A: Masa del espécimen seco en el aire, g
- B-C: Masa del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25°C, g, y
- B: Masa en el aire del espécimen saturado con superficie seca, g, y
- C: Masa del espécimen en agua, g.

1.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS DE AIRE (V_a) Y EN EL AHUELLAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS DURANTE EL SERVICIO

1.4.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS DE AIRE (V_a)

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos de aire (V_a). La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación del asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

“No hay mucha información cuantitativa disponible de investigaciones que permitan predecir el cambio del contenido de vacíos de aire (V_a) de mezclas in-sitú como una función de la densificación de mezclas debido a las repeticiones de carga sobre diferentes condiciones ambientales para diferentes tipos de mezcla, sin embargo existen fuentes de estudio de diversos factores que contribuyen al cambio en el contenido de vacíos de aire en una mezcla asfáltica en caliente. Entre los diversos factores, existen cuatro, los cuales influyen en mayor grado en la rata de cambio de los vacíos de aire como una función del tiempo, estos son:

- *Tránsito.*
- *Compactación durante la construcción (vacíos de aire iniciales).*
- *Condiciones ambientales.*



- *Características de la mezcla y el ligante*".⁸

1.4.1.1. TRÁNSITO

El grado de funcionalidad o servicio que ofrece una estructura de pavimento se mide por el grado de seguridad y comodidad que se ofrece al usuario durante el periodo de servicio. Es así como la magnitud e intensidad de las sollicitaciones inducidas por los vehículos conforman una de las variables a tener en cuenta en los distintos métodos de dimensionamiento de los pavimentos, para lo cual es necesario conocer el número, clase, configuración y peso de los vehículos que circulan por una vía, para determinar los efectos que las cargas de estos vehículos causan al pavimento.

“El tránsito es uno de los parámetros más importantes que influye en el cambio del porcentaje de vacíos de aire (Va) para una mezcla en particular. En general el efecto de todo el tránsito es una función de las cargas vehiculares, de los mecanismos de configuración de las cargas, de los volúmenes y de la velocidad de operación de los vehículos en el pavimento. Como el número de repeticiones incrementa, la densidad del concreto asfáltico incrementa, lo cual resulta en una disminución de los vacíos. Un alto porcentaje de carreteras es más susceptible a grandes cambios en el contenido de vacíos en relación a un menor volumen, si se mantienen constantes las otras variables”.⁹

“La densificación de una mezcla asfáltica por el tránsito en servicio también afecta su respuesta a la fatiga. Raithby y Ramshan (1972) encontraron, por ejemplo, que la compactación por tránsito de un tramo en un ensayo incrementó la vida a la fatiga para un nivel de esfuerzos dado, por un factor de 3 se incrementó la rigidez dinámica en un 60%. El efecto en la vida a la fatiga se debe al incremento en la rigidez y a la disminución en los vacíos de aire (Va)”.¹⁰

⁸ NCHRP Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and rehabilitated Pavement Structures. Appendix CC-2 Estimating Original Air Voids in GPS LTPP Sections. 2001. p5

⁹ Ibid., p.5-6

¹⁰ Guzmán M. María R, Marín U. Carlos R., Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave. Universidad del Cauca. 2003. p.133



1.4.1.2. COMPACTACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCION (Va iniciales)

La compactación es un proceso que consiste en comprimir un volumen dado, de mezcla asfáltica en caliente, en uno más pequeño. Esto se consigue al reacomodar las partículas de agregado, revestidas de asfalto, eliminando así la mayoría de los vacíos de aire (espacios) en la mezcla y aumentando la densidad (proporción entre la masa y el volumen) de la misma. Se considera que la compactación ha sido exitosa cuando la carpeta terminada tiene contenidos óptimos de vacíos de aire (Va) y de densidad.

“La necesidad de compactar un pavimento hasta lograr su densidad óptima puede entenderse mejor si se advierten los efectos del agua, el aire, y el tránsito en una mezcla sub-compactada. Los vacíos de aire en una mezcla sub-compactada tienden a estar interconectados y permiten la penetración de aire y agua a través del pavimento. El aire y el agua contienen oxígeno, el cual oxida el ligante asfáltico en la mezcla, causando que esta se vuelva frágil. En consecuencia el pavimento no podría resistir las deformaciones repetidas causadas por el tránsito, lo cual conducirá a su falla”.

Un pavimento que no ha sido compactado correctamente ya sea por error de diseño, exceso de compactación durante la colocación, o por un tránsito pesado no considerado durante el diseño producirá una disminución en el contenido de vacíos que puede producir ahuellamiento y/o la exudación de la mezcla. Además si no se dejan suficientes vacíos de aire en la mezcla compactada, el pavimento presentara afloramiento, y tenderá a volverse inestable debido a la reducción del contenido de vacíos de aire causada por el tránsito y por la expansión térmica del asfalto. El contenido óptimo de vacíos de aire (Va) en un pavimento recién construido, debe ser del orden del 6% o menos para mezclas densas, semi-densas y gruesas (INV. Art. 450.07). En este nivel, los vacíos no están, generalmente, interconectados. “La figura N° 13 es una representación gráfica del efecto de los vacíos sobre la durabilidad del pavimento. Cuando el contenido de vacíos es demasiado alto, el pavimento tiende a presentar fallas estructurales prematuras. Cuando el



contenido de vacíos es demasiado bajo, hay peligro de que el pavimento presente afloramiento y se vuelva inestable”.¹¹

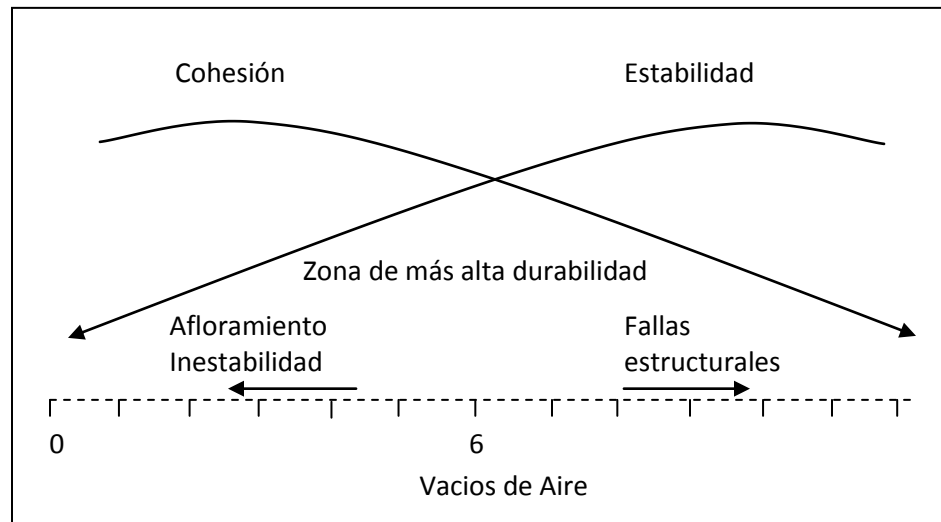


FIGURA N° 13. Durabilidad del pavimento versus V_a

Fuente: Asphalt Institute

“El porcentaje inicial de vacíos es entonces función de los requisitos (estándares de las especificaciones de construcción) de la mezcla de diseño y de la compactación en campo. La compactación en el tiempo de construcción define la densidad inicial de la mezcla y los vacíos de aire iniciales. El contenido inicial de vacíos de una mezcla (V_a de diseño) puede incidir en la magnitud de la variabilidad de cambio de los mismos cuando el tránsito se haga presente en el pavimento, ya que contenidos de V_a iniciales altos pueden dar lugar a grandes cambios (descensos) en dicho volumen, si se compara con bajos valores de V_a iniciales o de diseño. El contenido de vacíos de aire en la mezcla que se consigue después de un cierto tiempo de puesta en servicio, se conoce en la “nueva guía de diseño empírico – mecanicista y de rehabilitación de estructuras de pavimento” como vacíos de aire de la mezcla envejecida en el tiempo o vacíos por rechazamiento”.¹²

¹¹ Asphalt Institute. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica. Serie de Manuales No. 22. p.215-216.

¹² NCHRP. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and rehabilitated Pavement Structures. Appendix CC-2 Estimating Original Air Voids in GPS LTPP Sections. 2001. p.6.



1.4.1.2.1. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO

1.4.1.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL LIGANTE

A temperatura ambiente el asfalto es virtualmente sólido, mientras que a temperaturas entre 120 y 150°C es completamente fluido, para que una mezcla pueda ser compactada correctamente, el asfalto debe tener suficiente fluidez para permitir que las partículas de agregado se muevan unas respecto a otras. En efecto el asfalto trabaja como un lubricante durante la compactación. A medida que la mezcla se enfría el asfalto pierde fluidez (se vuelve más viscoso). Es así como a temperaturas por debajo de 85°C, el asfalto, en combinación con los finos de la mezcla, comienza a ligar firmemente las partículas de agregado. En consecuencia la compactación de la mezclas se hace extremadamente difícil cuando se ha enfriado por debajo de 85°C

La viscosidad del asfalto está determinada por el grado de asfalto usado y por la temperatura a la cual se produce la mezcla. Un asfalto de alta viscosidad puede requerir una temperatura ligeramente mayor de compactación y/o un mayor esfuerzo de compactación, siempre y cuando permanezcan constantes todos los demás factores.

La trabajabilidad también está afectada por la cantidad de asfalto en la mezcla. A medida que aumenta el contenido de asfalto, el espesor de película de asfalto sobre las partículas de agregado también aumenta. Este aumento de espesor de película, aumenta a su vez, el efecto lubricante del asfalto a las temperaturas de compactación, y hasta cierto punto hace que la compactación sea más fácil de efectuar.

1.4.1.2.1.2. TEMPERATURA DE LA MEZCLA

La temperatura a la cual una mezcla asfáltica es producida afecta la facilidad de compactación.



Hasta cierto nivel, entre más caliente este la mezcla, más fluido será el asfalto y menos resistente será la mezcla bajo la compactación. Investigaciones realizadas en Estados Unidos¹³ y Francia¹⁴ han podido demostrar que la temperatura de compactación de una mezcla asfáltica, genera problemas de segregación, resistencia y fatiga. Steve Read, en 1996, detectó este problema en la construcción de varias vías en Estados Unidos, las cuales estudió en detalle con ayuda de cámaras termográficas, determinando que se presentaban diferenciales de temperatura en el habitáculo



IMAGEN N° 24. Mezcla asfáltica en el habitáculo de una volqueta
Fuente: Revista facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia No. 36

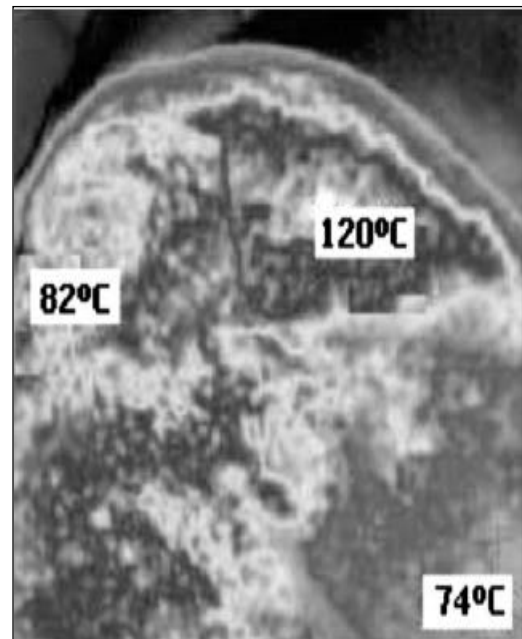


IMAGEN N° 25. Temperatura de la mezcla asfáltica en el habitáculo de la volqueta
Fuente: Revista facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia No. 36

de las volquetas, en las pavimentadoras (ver imagen N° 24 y N° 25) y en el proceso de extendido y compactado. En el año de 1998, al sur de Baline, Washington, se realizó un seguimiento con cámara termográfica a la construcción de una vía, donde la mezcla asfáltica se acarreo por 89 kilómetros se colocó en una pavimentadora y se extendió (ver imágenes N° 26 y N° 27), analizadas las fotos termográficas, se extrajeron núcleos de las zonas de compactación ideal y de las zonas de

¹³ Brock. D. Segregación causas y soluciones boletín técnico T-117S, Chatagoohana. ASTEC. 2002. p. 1-34

¹⁴ Charrier. J. Evaluation de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux apports de la thermographie infrarouge. Nantes. Bulletin Laboratoire Centrales des Ponts et Chaussées N° 232. 2001. p 19-29

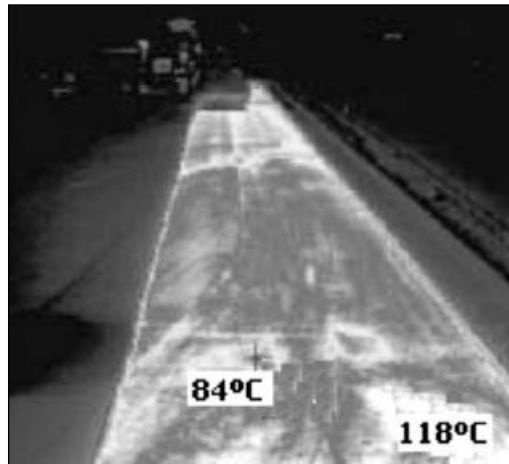


IMAGEN N° 26. Temperatura de mezcla extendida.

Fuente: Revista facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia No. 36

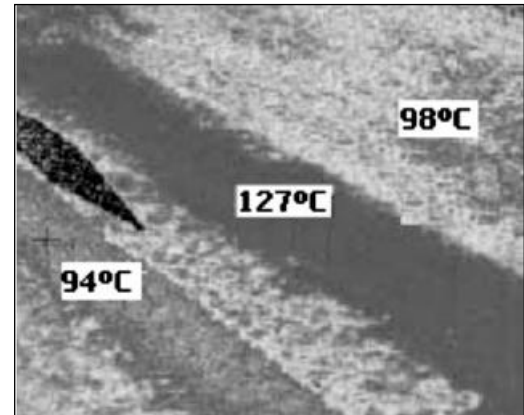


IMAGEN N° 27. Temperatura de mezcla extendida.

Fuente: Revista facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia No. 36

bajas temperaturas, obteniéndose resultados donde la relación de vacíos y deformaciones se incrementaba a bajas temperaturas.

1.4.1.2.1.3. CONDICIONES AMBIENTALES

Las capas de rodadura se encuentran en la parte superior del pavimento, en contacto directo con los vehículos y sometidas también directamente a la acción de los agentes atmosféricos. Las condiciones climáticas influyen de manera significativa en la durabilidad de los materiales que conforman las capas de un pavimento, en el comportamiento mecánico que presentan los diferentes suelos, especialmente los más susceptibles al agua, dependiendo de las condiciones de drenaje, en el contenido de humedad de equilibrio y, también, en el comportamiento reológico y envejecimiento de las capas ligadas con asfalto.

“Los factores ambientales que inciden en el envejecimiento del asfalto son claramente conocidos y es claro que la temperatura juega un papel importante en el comportamiento y respuesta de una mezcla asfáltica”. Las variaciones de temperatura en la zona del proyecto de pavimentación influyen directamente en las propiedades del ligante asfáltico y por lo tanto en las de la mezcla asfáltica, especialmente en el cambio de sus características mecánicas y dinámicas. Una misma mezcla



asfáltica tendrá un comportamiento diferente ante la acción de las cargas si es colocado en un clima frío o en un clima cálido.

Por lo anterior los diseñadores de pavimentos deben considerar en los estudios las condiciones climáticas y evitar el uso de materiales susceptibles al agua ó muy sensibles a la temperatura.

“Altas temperaturas hacen que el asfalto disminuya su viscosidad, la mezcla por lo tanto disminuye la rigidez y aumenta la susceptibilidad a la compactación bajo las cargas del tránsito, lo que trae consigo grandes variaciones en los vacíos de aire (V_a) si se mantienen constantes las otras variables”.¹⁵

Vásquez. R. Marcos V., indica los diversos comportamientos del cemento asfáltico bajo la acción de la temperatura, como sigue:

“Comportamiento del asfalto a alta temperatura, en condiciones de altas temperaturas o bajo cargas aplicadas suavemente (zonas de movimiento lento de vehículos), el asfalto actúa como un líquido viscoso. Bajo estas circunstancias, el agregado es la parte de la mezcla asfáltica que soporta la carga, mucho más que el asfalto. Los asfaltos líquidos exhiben un comportamiento plástico porque una vez empiezan a fluir, no retornan a su posición original, esta es la razón del porque bajo altas temperaturas de servicio, algunas mezclas asfálticas menos estables, fluyan bajo las cargas de llantas (cargas repetidas) y presentan una acumulación de deformación al paso de vehículos (rutting). El rutting en pavimentos asfálticos es también influenciado por las características del agregado”.

Comportamiento del asfalto a bajas temperaturas, en periodos de bajas temperaturas o bajo cargas aplicadas rápidamente, el asfalto actúa como un sólido elástico. Un sólido elástico posee un esfuerzo último el cual, cuando es cargado más allá de su nivel, puede fracturarse. Las grietas por temperatura

¹⁵ NCHRP. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and rehabilitated Pavement Structures. Appendix CC-2 Estimating Original Air Voids in GPS LTPP Sections. 2001. p.6.



pueden ocurrir en los pavimentos asfálticos en periodos de baja temperatura cuando una carga térmica es aplicada por los esfuerzos de tensión internos que pueden suceder en el pavimento cuando se contrae, mientras está siendo restringida por las capas inferiores (base y subbase).

Comportamiento del asfalto a temperaturas intermedias, la mayoría de los pavimentos son construidos en lugares en donde experimentan temperaturas moderadas e intermedias la mayor parte del tiempo, por lo que experimentan temperaturas bajas o altas en períodos relativamente cortos de tiempo cada año. A estas temperaturas, los ligantes asfálticos presentan características de un líquido viscoso y de un sólido elástico. Debido a este comportamiento el asfalto,

para el ingeniero civil, es un material extremadamente complicado para entenderlo y explicarlo.¹⁶

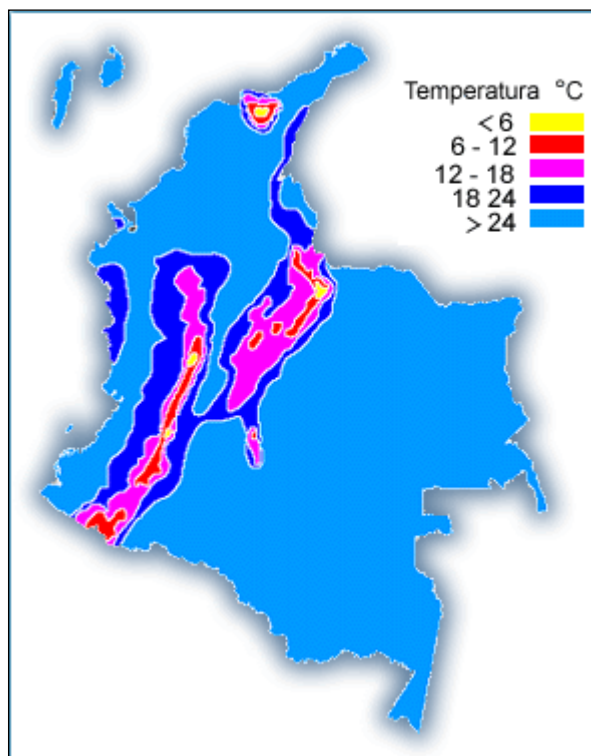


FIGURA N°14. Mapa del promedio multianual de temperatura
Fuente: www.todacolombia.com

Por las razones expuestas, es que en el diseño de estructuras de pavimento la variable clima es involucrada, de ahí que se deban conocer la temperatura media anual ponderada del proyecto (como parámetro de medida del ambiente), la cual influye directamente en la variación del contenido de vacíos de aire (Va) en la mezcla asfáltica. Generalmente en nuestro país se consulta al IDEAM las temperaturas medias mensuales de los últimos 10 años, ya que este organismo cuenta con los datos de la red de estaciones climatológicas, datos que permitirán encontrar la temperatura de la mezcla a

¹⁶ Vásquez R. Marcos V, Superpave Consideraciones Recientes. Ministerio de Obras Públicas del Salvador. Unidad de Investigación y Desarrollo Vial 2001



través de formulas y/o ábacos que proporcionan las diferentes entidades dedicadas al estudio de los pavimentos.

En Colombia la temperatura del aire esta directamente influenciada por factores que modifican su comportamiento como la altitud, la ubicación geográfica y las continuas corrientes y masas de aire que penetran el territorio. La mayor parte del país presenta temperaturas que exceden los 24°C en especial en las regiones Caribe, Pacífica, Amazónica y la Orinoquía, que representan casi el 80% del territorio Colombiano. En la costa atlántica, la temperatura media oscila entre los 24°C y 28°C, sin embargo pueden registrarse temperaturas de hasta 30°C en la parte baja de la Guajira y al sur oriente de los departamentos del Atlántico y Sucre. Valores de temperatura por debajo de la media nacional, se presentan en la Región Andina donde los regímenes promedio son más complejos. Esto se debe a la presencia de los llamados pisos térmicos que se presentan con la disminución de la temperatura media del aire a medida que la altitud aumenta, en esta región se observan diferentes franjas de temperaturas desde muy altas en los valles interandinos como el Magdalena y el Cauca hasta temperaturas muy bajas como las registradas en los altiplanos Cundiboyacences o de Nariño, a su vez, en esta región también se presentan temperaturas extremadamente bajas (< 0°C) como las del macizo volcánico de la Cordillera Central o como en el Nevado del Cocuy.

El programa estratégico de investigación de carreteras de los EE.UU, conocido por su nombre corto en Ingles como SHRP (Strategic Highway Research Program), establece la temperatura en la capa de rodadura, la cual difiere de la ambiente, con el fin de determinar la temperatura de diseño, mediante la siguiente expresión:

$$T_{20\text{mm}} = (T_{\text{aire}} - 0.00618 \times \text{Lat.}^2 + 0.2289 \times \text{Lat.} + 42.2) \times 0.9545 - 17.78$$

Donde:

$T_{20\text{mm}}$: Temperatura del pavimento a una profundidad de 20 mm, en °C,

T_{aire} : Temperatura del aire promedio para los 7 días más calientes del año, en °C, y

Lat: Latitud del proyecto en grados



La expresión anterior también permite determinar con base en las temperaturas medias que se presentan en cualquier latitud, que temperaturas adquieren las mezclas en condiciones de servicio y de esta forma reproducir este escenario en el laboratorio

1.4.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA Y EL LIGANTE

1.4.1.3.1. TIPOS DE GRADACIONES EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los materiales disponibles para capas de rodadura son: mezclas asfálticas en caliente de granulometría continua (densas y semi-densas), drenantes y discontinuas. Las mezclas densas y semi-densas a las cuales solo nos referiremos por ser parte de esta investigación son mezclas de gradación continua con fuerte esqueleto mineral y que se pueden utilizar en todas las capas del pavimento, es la mezcla bituminosa más empleada no solo en Colombia sino a nivel mundial, pueden ser del tipo cerrado (Va ente 3 y 6%), medio (Va entre 6 y 12%) y abierto (Va > 12%), los que se utilizan como capa de rodadura son del tipo cerrado.

Aurelio Ruiz indica en su artículo “Panorámica Española de las Mezclas Bituminosas”¹⁷ lo siguiente respecto al análisis entre mezclas densas y semi-densas:

- Las mezclas densas tienen más agregado fino y por tanto una mayor superficie específica de agregado que las mezclas semi-densas. Por tanto necesitan más asfalto para envolver las partículas y conseguir el mismo porcentaje de vacíos de aire.
- Las mezclas densas tienen un menor esqueleto mineral de áridos gruesos, y por tanto son menos estables ante las cargas (más problemas de deformaciones plásticas).
- Las mezclas densas, al tener menos estabilidad intrínseca son críticas en los contenidos de ligante, lo que quiere decir que pequeñas diferencias en el contenido de asfalto pueden originar importantes diferencias de

¹⁷ Aurelio Ruiz, Panorámica Española de las Mezclas Bituminosas. Desarrollos recientes. Consideraciones de futuro. Centros de Estudios del Transporte del CEDEX



comportamiento frente a las deformaciones plásticas.

- En general las mezclas densas al tener mayor contenido de arena que las semi-densas tienen menos macrotextura, ya de por sí escasa en este tipo de materiales. Las granulometrías situadas en la parte superior de la especificación pueden llegar incluso a ser deslizantes.

Algunas veces se prefiere las mezclas densas frente a las semi-densas con el criterio erróneo de que llevan más ligante bituminoso y por tanto son más impermeables. El mayor contenido de cemento asfáltico se debe, como ya se ha señalado, al mayor contenido de arena. La impermeabilidad viene dada fundamentalmente por el contenido de vacíos de aire y con ambas mezclas se puede conseguir el mismo nivel de vacíos (4 a 6% para capas de rodadura en tránsitos elevados y 3 a 5% con tránsitos bajos).

De las conclusiones anteriores, comenta Aurelio Ruiz, “se deduce por tanto el campo de aplicación de ambas mezclas. En general son preferibles las mezclas semi-densas por su mayor estabilidad frente a las deformaciones plásticas. Las mezclas densas exigen muchas precauciones en su dosificación si se emplean en zonas cálidas (por la posible sensibilidad a las deformaciones plásticas) o en vías de alta velocidad (por la posible falta de macrotextura). Las mezclas densas pueden ser más adecuadas para mezclas en pequeño espesor en firmes muy flexibles (vías de bajo tránsito) o, como señala el PG-3, para rodaduras de bermas”.

Según lo citado se establece entonces que la granulometría también afecta la susceptibilidad a la compactación, en particular gradaciones semi-densas da lugar a mezclas más rígidas de menor tendencia a experimentar cambios volumétricos por efecto del tránsito.

1.4.1.3.2. TIPOS DE LIGANTE EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

La utilización de cementos asfálticos duros y menos susceptibles a la temperatura da lugar a mezclas rígidas que bajo las mismas condiciones de operación, ambiente y tránsito, tienen menor



tendencia al cambio volumétrico, dando como resultado una disminución en los cambios de vacíos de aire comparados con mezclas poco rígidas.

1.4.1.3.3. ESPESOR DE PELÍCULA DEL LIGANTE ASFÁLTICO QUE RECUBRE LAS PARTÍCULAS

En la respuesta de una mezcla asfáltica a la acción del tránsito en una determinadas condiciones ambientales además, de lo ya citado, (granulometría, Va iniciales y tipo de asfalto), incide la cantidad de ligante aplicado al agregado o sea el espesor de película alrededor de las partículas de agregado. La determinación del espesor de película es complejo intervienen variables como la superficie específica de las partículas de agregado y del llenante, absorción de asfalto por parte del agregado, gravedades específicas de los diferentes materiales que intervienen en la mezcla. Lo más dispendioso es cuantificar la participación de las diferentes partículas en el área superficial total del agregado. Existen varios métodos para estimar el espesor. En Colombia en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo del Instituto Nacional de Vías se estableció el Índice de Espesor Película (IPL) estimado con base en la NORMA INV E-741-07. Este método describe el procedimiento de cálculo para determinar el Índice de Película de Asfalto o Espesor de Película de Ligante en metros, que cubre el agregado, de acuerdo con el método de la AUSTROADS pruebas de asfaltos, aplicable a todos los tipos de asfaltos.

El cálculo del IPL procura proporcionar una medida de la capa de ligante que cubre los agregados cuando son mezclados con el asfalto. El valor determinado no se debe considerar como la media del espesor de película de ligante que cubre cada partícula.

Se determina con base en la siguiente expresión:

$$IPL = \frac{P_{be}}{100 - P_b} \times \frac{D_{sb}}{2.65 \times A} \times \frac{10^3}{D_b}$$



Donde:

- IPL: Índice de película de ligante, o espesor de película,
Pbe: Contenido de asfalto efectivo (% de la masa de la mezcla),
Pb: Contenido de asfalto total (% de la masa total de la mezcla),
Db: Densidad del ligante a 25°C, t/m³,
Dsb: Densidad bulk combinada del agregado, t/m³, y
A: Área superficial del agregado combinado, m²/kg.

$$A = (2 + 0.02a + 0.04b + 0.08c + 0.14d + 0.30e + 0.60f + 1.60g) \times 0.20482$$

Donde:

- A: Área superficial del agregado combinado, m²/kg,
a: Porcentaje pasa el tamiz de 4.75 mm (No 4),
b: Porcentaje pasa el tamiz de 2.36 mm (No 8),
c: Porcentaje pasa el tamiz de 1.18 mm (No 16),
d: Porcentaje pasa el tamiz de 0.60 mm (No 30),
e: Porcentaje pasa el tamiz de 0.30 mm (No 50),
f: Porcentaje pasa el tamiz de 0.15 mm (No 100), y,
g: Porcentaje pasa el tamiz de 0.075 mm (No 200).

1.4.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL AHUELLAMIENTO

Se pueden presentar con contenidos de vacíos muy bajos (< 3%) o con contenidos de vacíos muy altos (> 6%) ahuellamientos, que se manifiestan como variaciones permanentes del perfil superficial de la capa de mezcla asfáltica por acumulación de deformaciones permanentes y/o por desplazamiento de la masa misma. “El efecto se presenta en los primeros 7 a 10 cm de mezcla más cercanos a la superficie (Brown, Cross, 1992). La mezcla asfáltica bajo esta profundidad se encuentra aislada térmicamente y además está sometida a esfuerzos menores que las capas



superiores. Este tipo de ahuellamiento es independiente del diseño estructural del pavimento”¹⁸. En condiciones normales de operación, las deformaciones producidas por el tránsito son despreciables, sin embargo existen factores que tienden a aumentar la tasa de deformación de la mezcla asfáltica y eventualmente producen ahuellamiento.

Se analizarán a continuación los factores que afectan las deformaciones permanentes en las MAC¹⁹.

- *Tipo de asfalto*, el centro de investigación francés Corté et al (1992), realizó una serie de pruebas en la pista circular del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), encontrando un evidente aumento en la resistencia de la mezcla a la generación de deformaciones permanentes, con la utilización de asfaltos modificados con polímeros (SBS), multigrados y duros (50/70). “Mientras que no existe una diferencia entre los asfaltos modificados con polímeros y los multigrados en ciclos de carga bajos, más allá de este punto, los asfaltos modificados exhiben un rápido crecimiento en el ahuellamiento.”
- *Tipo de agregado*: “Investigaciones indican que para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, más resistentes y de mayor fricción interna. El mismo concepto es aplicado en las mezclas SMA (*Stone Mastic Asphalt* o *Stone Matrix Asphalt*). La cantidad de agregado de menor tamaño debe ser tal que pueda ser colocado en el espacio que dejan los agregados más gruesos, sin interferir en su contacto interparticular, y así sucesivamente con los tamaños más finos”²⁰.

Elliott et al. (1991) utilizaron información de pruebas de fluencia para examinar los efectos de la vida relativa en términos del desarrollo de ahuellamientos. “Para llevar a cabo comparaciones se tomó como base una mezcla de trabajo que consiste en material que pasa

¹⁸ Thenoux Z. Guillermo., Carrillo O. Hector. Análisis de ahuellamiento en mezclas asfálticas Chilenas. Centro de Ingeniería e Investigación Vial CIIV. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile

¹⁹ Garnica. P., Gómez. J., Sesma. J. A., Mecánica de Materiales para Pavimentos. Capítulo 5 deformaciones permanentes y fatiga en concretos asfáltico Ciudad de México. México. 2002. P.20-29

²⁰ Thenoux Z. Guillermo., Carrillo O. Hector. Análisis de ahuellamiento en mezclas asfálticas Chilenas. Centro de Ingeniería e Investigación Vial CIIV. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile



la malla No. 4 y se retiene en la No. 10. La mezcla está compuesta de 18% de agregado granular, 37% de arena granular y 47% de arena fina. Estos porcentajes se utilizaron también para las demás variaciones de granulometrías (fina, granular, fina-granular y granular-fina).” Los resultados obtenidos muestran que las granulometrías finas y granulares experimentan profundidades de ahuellamiento de 7 a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y viceversa, experimentan profundidades de ahuellamiento de 13 a 19% mayores.

Harvey y Monismith (1993) en un estudio similar consideraron dos tipos de agregados: “granulometría con bajo contenido de finos (2.5%) y granulometría con contenido normal de finos (5.5%) y TM de 1 pulgada e igual proporcionamiento”. La reducción en el contenido de finos en un 3% resultó en un cambio sorprendente en la resistencia a la formación de deformaciones permanentes. Para el contenido bajo de finos se obtuvo una diferencia del 131% con respecto a la otra granulometría. Monismith et al, (1994) encontró que “la variación de un agregado con granulometría abierta a uno con granulometría continua, incrementa la resistencia de las mezclas asfálticas.”

- *Forma, textura y tamaño de las partículas:* Monismith et al, (1994) señalaron que un cambio en la forma, tamaño y textura superficial de los agregados, genera a su vez una variación en la resistencia al ahuellamiento. Así pues, el cambio de una forma redondeada a una angular, incrementa la resistencia de los pavimentos a la generación de ahuellamientos. Lo mismo sucede cuando se presenta un cambio de una textura suave a una rugosa, y cuando se incrementa el tamaño máximo de los agregados.
- *Contenido de asfalto,* en el estudio de Monismith de 1994, se desarrollaron una serie de pruebas con el fin de analizar el efecto del contenido de asfalto sobre la deformación permanente. Los resultados indican que para porcentajes de asfalto altos las mezclas tienden a mayores deformaciones inelásticas, ya que para contenidos de vacíos (V_a) mayores se producen, también, mayores deformaciones permanentes.



- *Contenido de vacíos (Va) en la mezcla*, Monismith et al, (1994) observaron que un incremento en el contenido de vacíos de la mezcla, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la generación de ahuellamientos, ratificando lo expuesto en el punto anterior. “Este punto se pudo analizar al realizar diversas pruebas de compresión axial en fluencia.” como es de esperarse, “las mezclas con bajo contenido de vacíos se comportaron mejor que las mezclas de altos contenidos.”
- *Contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM)*, un incremento en el contenido de vacíos en el agregado mineral, provoca un decremento en la resistencia de la mezcla a la generación de ahuellamientos. Observación realizada por Monismith en 1994. Kandhal y Mallick (2001), utilizando distintos tipos de agregados (calizas, granitos y gravas), observaron que este factor está íntimamente relacionada con el espesor de la capa asfáltica. “Un incremento en los vacíos y en el espesor” se ve reflejado en un incremento de las deformaciones plásticas para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en dichas deformaciones, de mezclas con gravas. Sin embargo en este momento, el efecto de los VAM sobre el ahuellamiento no está claramente entendido y estudiado, por lo que se requieren mayor investigación y estudios en dicha materia para comprender completamente dicho efecto.
- *Método de compactación*, Harvey (1992) concluyó que los métodos de compactación giratorios, de rodillo y de amasado producen especímenes que son significativamente diferentes con respecto a la resistencia para resultados de pruebas repetitivas de deformación cortante permanente, con resultados promedio que difieren por más de un orden o magnitud entre cada método para asfaltos convencionales. Esto indica que la selección de un método de compactación en laboratorio tendrá al menos tanto efecto sobre el comportamiento de la mezcla como el tipo de agregado, tipo de ligante, contenido de finos o contenido de vacíos.

Monismith et al. (1994) señalaron que el método de compactación, ya sea en campo o en laboratorio, puede influenciar la estructura del sistema y por lo tanto, la propensión al ahuellamiento.



- *Temperatura*, Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de ahuellamientos.
- *Agua*, El agua puede incrementar la propensión de una mezcla a la deformación permanente. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mismas. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla, cuando ésta es sensible al agua.

Padilla R. Alejandro., cita:

“Otras causas que producen deformaciones plásticas son:

- Errores en el diseño de la mezcla, ya que las propiedades del ligante no son las mismas a la temperatura de caracterización que a la temperatura de servicio.
- Contaminación del ligante asfáltico con solventes (aceite quemado).
- Insuficiente estabilidad del material todavía caliente cuando se ha permitido anticipadamente el paso del tránsito.
- Tiempo de aplicación de las cargas más prolongado que el previsto, debido a que las mezclas asfálticas tienen respuesta más elástica a las cargas de corta duración y menos elásticas a las cargas lentas. Por esta razón, las deformaciones plásticas se presentan sobre todo en zonas de tránsito lento.
- Degradaciones variadas del agregado pétreo”²¹.
- Condiciones climatológicas.

²¹ Padilla R. Alejandro., Capítulo 3, Mezclas Asfálticas UPC. p. 62-63



1.5. ESTÁNDARES VOLUMÉTRICOS

1.5.1. ARTÍCULO 450 INV-07 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.

Los estándares de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías, establecen un valor de porcentaje de vacíos de aire (Va) en función del tránsito al cual estará sometida la mezcla asfáltica, tal como lo muestra el cuadro N° 1.

CUADRO N° 1. Criterios para diseño de mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

INV Artículo 450-07.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748	50	75	75	75	
Estabilidad mínima (kg)	E-748	500	750	900	1500	
Flujo (mm)	E-748	2 – 4	2 – 4	2 – 3.5	2 – 3	
Vacíos de aire(Va)*, %	Rodadura	E-736 o E-799	3 – 5	3 – 5	4 – 6	–
	Intermedia		4 – 8	4 – 8	4 – 7	4 – 6
	Base		–	5 – 9	5 – 8	–
Vacíos en los agregados minerales (VAM), %	Mezclas 0	E-799	≥ 13	≥ 13	≥ 13	–
	Mezclas 1		≥ 14	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Mezclas 2		≥ 15	≥ 15	≥ 15	–
	Mezclas 3		≥ 16	≥ 16	≥ 16	–
% de vacíos llenos de asfalto (VFA): (Volumen de asfalto efectivo / Vacíos en los agregados minerales) x 100 Capas de rodadura e intermedia	E-799	65 – 80	65 – 78	65 – 75	63 – 75	
Relación Llenante/Asfalto efectivo, en peso	E-799	0.8 – 1.2			1.2 – 1.4	
Concentración de llenante, valor máximo	E – 745	Valor crítico				

En particular para las mezclas asfálticas densas, semi-densas y gruesas, a emplear como capas de rodadura en un pavimento que estará sometido a tránsito alto, la norma establece un porcentaje



de vacíos de aire (V_a) entre 4 y 6 y para tránsito bajo y medio un porcentaje de vacíos de aire (V_a) entre 3 y 5, lo cual a la vez permite también ejercer un control de calidad de la mezcla ya colocada.

1.5.2. ESTÁNDARES VOLUMÉTRICOS SUPERPAVE, NORMA AASHTO M 323-04

Por otro lado los estándares para diseño de mezclas asfálticas dados por la SHRP, establecen como requerimiento de diseño un porcentaje de V_a de 4 (equivalente a un Gmm del 96%) y como requerimiento de control por la acción del tránsito un porcentaje de V_a de 2 (equivalente a un Gmm del 98%) para todo tipo de tránsito, en función de las cargas en millones de ESALs y el número de giros de diseño ($N_{\text{diseño}}$) y máximos ($N_{\text{máximo}}$) respectivamente, tal como se muestra en el cuadro N° 2, valores que indican, la reducción del porcentaje de vacíos a medida que se incrementa el número de giros dados en el compactador giratorio Superpave (SCG), como consecuencia de la puesta en servicio de la mezcla.

CUADRO N° 2. Criterios para diseño de mezclas por el método Superpave. AASHTO M 323-04²²

Desing ESALs ^a (Million)	Required Relative Density, Percent of Theoretical Maximum Specific Gravity			Voids in the Mineral Aggregate (VMA), Percent Minimum						Voids Filled with Asphalt (VFA) Range, ^b Percent	Dust-to Binder Ratio Range ^c
				Nominal Maximum Aggregate Size, mm							
	N_{initial}	N_{design}	N_{max}	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75		
<0.3	≤91.5	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	70-80 ^d	0.6-1.2
0.3 to<3	≤90.5	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-78	0.6-1.2
3 to<10	≤89.0	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-75 ^e	0.6-1.2
10 to<30	≤89.0	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-75 ^e	0.6-1.2
≥30	≤89.0	96.0	≤98.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-75 ^e	0.6-1.2

^a Design ESALs are anticipated project traffic level expected on the design lane over a 20-year period. Regardless of the actual design life of the roadway, determine the design ESALs for 20 years.

^b For 37.5-mm nominal maximum size mixtures, the specified lower limit of the VFA range shall be 64 percent for all design traffic levels.

^c For 47.5-mm nominal maximum size mixtures, the dust-to-binder ratio shall be 0.9 to 2.0.

^d For 25.0-mm nominal maximum size mixtures, the specified lower limit of the VFA range shall be 67 percent for design traffic levels <0.3 million ESALs.

^e For design traffic levels > 3 million ESALs, 9.5-mm nominal maximum size mixtures, the specified VFA range shall be 73 to 76 percent and for 4.75-mm nominal maximum size mixtures shall be 75 to 78 percent.

²² Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. AASHTO Designation M 323-04.



CUADRO N° 3. Esfuerzo a aplicar en el SCG

Design ESALS ^a (million)	Compaction Parameters		
	N _{initial}	N _{design}	N _{max} *
<0.3	6	50	75
0.3 to<3	7	75	115
3 to<30	8	100	160
≥30	9	125	205

Se puede observar que se establece una diferencia dentro de los estándares INVIAS al considerar los volúmenes de tránsito, dicha variabilidad dada en el porcentaje vacíos de aire (V_a), obedece a que entre más grande sea el tránsito, este ejercerá una compactación adicional a la mezcla, mientras que en los estándares SUPERPAVE se muestra que sin distinguir el tipo de tránsito el contenido de vacíos es invariante ($N_{\text{diseño}}$), para efectos de diseño y control de calidad.

Tanto los criterios de diseño dados por el INVIAS como los de la SHRP, obedecen a métodos de diseño de mezclas asfáltica en caliente, MARSHALL y SUPERPAVE respectivamente, en los que se aplica una energía de compactación para la elaboración de especímenes de diseño, en el primero se aplican golpes (compactación por impacto) y en el segundo se aplican giros (compactación por amasado, cuadro N° 3), siendo este último procedimiento el que mejor representa la compactación de campo y al cual nos referiremos a continuación.

1.6 EL COMPACTADOR GIRATORIO

La compactador giratorio es el sistema más apropiado para evaluar las características de compactación de las mezclas asfálticas, bajo el concepto de que la compactación giratoria simula mejor la compactación en el campo. Es importante notar que las características de compactación están disponibles para predecir las características del pavimento no sólo en el momento de la construcción, sino también a través de la vida en servicio.



1.6.1 HISTORIA DEL COMPACTADOR GIRATORIO ²³.

A través de la evolución de las mezclas asfálticas, se han desarrollado diferentes tipos de dispositivos de laboratorio para compactación. En general, los aciertos de éstos es que fabrican especímenes para caracterización volumétrica y física y permiten predecir el comportamiento en obra. Los compactadores giratorios aplican un esfuerzo de amasado para producir especímenes cilíndricos y han experimentado una evolución resultado de varios dispositivos únicos y una variedad de métodos.

1.6.1.1 COMPACTACIONES GIRATORIAS.

“En 1939 el Texas Highway Department inició una investigación sobre el diseño y control de mezclas asfálticas. Previamente los métodos de prueba y error se utilizaban confiando en cómo se veía y se sentía la mezcla bajo carga. Se establecieron criterios para métodos realizados en laboratorio; en el primero, el método debía ser igualmente adaptable para el control de la mezcla tanto en campo como en el diseño. En segundo lugar, el método debía producir esencialmente la misma densidad o proporción de vacíos, como se obtendría en el pavimento terminado”.

Debía tener en cuenta que las condiciones de estado del pavimento durante el tiempo de servicio son importantes y comprendiendo que la densidad se incrementa a un máximo con el tiempo y tránsito vehicular, la densidad deseada que se debía obtener con cualquier procedimiento de moldeado, necesitaba aproximarse a la del pavimento después de un tiempo en servicio.

“Dado que el agregado deberá resquebrajarse, bajo métodos de compactación de campo, entonces el tercer requerimiento del método de moldeo fue el de aproximar lo más posible a la degradación del agregado obtenida, bajo las condiciones de operación”.

²³ Garnica. A. Paul., Gómez. L. José A., Delgado A. Horacio., Algunos aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio., Secretaría de Comunicaciones y Transporte., Instituto Mexicano del Transporte. 2003. p.3-7



IMAGEN N° 28. Prensa giratoria de Texas.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte.
Publicación técnica N° 228

“La compactación giratoria se ha empleado en diseños de mezclas asfálticas desde 1930, cuando se desarrolló un procedimiento por el Texas Highway Department (Department of Transportation, actualmente); en cuanto al desarrollo del concepto giratorio, éste es atribuible a Philippi, Raines y Love” (Imagen N° 28).

“Durante la pasada II Guerra Mundial el cuerpo de ingenieros se comprometió a desarrollar tecnología militar para uso civil. El diseño de mezclas Marshall iniciado por el Mississippi Highway Department y aplicado en construcciones de campos de aviación se adoptó para uso de carreteras civiles”.

“John L. McRae junto con el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos y basado en los principios del Texas Highway Department, desarrollo “el compactador de amasado giratorio del Cuerpo de Ingenieros” (Imagen N° 29). Fue desarrollado en respuesta a la experiencia de los años 50 que mostraron que el impacto del martillo Marshall no simulaba las densidades producidas por las ruedas de aviones pesados. McRae también creía que las propiedades mecánicas de las pruebas de especímenes producidas por los impactos del martillo Marshall, no representaban las propiedades de los especímenes tomadas de los pavimentos”.



IMAGEN N° 29. Compactador de amasado giratorio del Cuerpo de Ingenieros.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte.
Publicación técnica N° 228

“Al final de los años 50 durante una visita de intercambio de tecnología, la idea del compactador giratorio fue introducida a Francia, al grado que durante



los 60 y principios de los 70 el desarrollo del protocolo del compactador giratorio Francés quedó establecido, generándose extensos estudios para investigar el mecanismo giratorio; incluían la forma de las curvas de densificación giratoria y efectos de la gradación del agregado, aun como contenidos de relleno mineral y propiedades del asfalto sobre la posición e inclinación de la curva. Durante los mismos hubo estudios para investigar las características de la compactación de la



IMAGEN N° 30. Francis Moutier (LCPC) con el PGC-2

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. Publicación técnica N° 228

mezcla mediante rodillos y relacionar los resultados de propiedades de densificación de la mezcla en el compactador".

“El compactador giratorio LCPC aplica un ángulo fijo de un grado (1°) y una presión vertical constante (600kPa) que es mantenida en el espécimen; los giros se aplican a una proporción constante de seis giros por minuto a través del proceso de compactación (Imagen N° 30)”.

“En el sistema francés, el esfuerzo de compactación estándar en campo se define como una sucesión de rodillos estandarizados. En laboratorio, el número de giros con el compactador depende del espesor de la capa de pavimento. Si éste se incrementa, la mezcla se vuelve fácil de compactar en la carretera y el número de giros aumenta. Para cualquier estructura de agregado significará que el contenido de asfalto puede decrecer y la mezcla ser más difícil de compactar”.

“El incremento en la dificultad de la compactación se compensa por el aumento del espesor, el cual reduce el esfuerzo de compactación requerido para obtener la densidad. En el método de diseño de mezclas, el cambio de los giros se diseña para balancear los dos efectos del espesor, el resultado final es una compactabilidad constante sobre la carretera”.

“El Congreso de los Estados Unidos autorizó en 1987 el Strategic Highway Research Program (SHRP). Este esfuerzo fue conducido de 1987 a 1993. Inicialmente el SHRP se enfocó a



investigación de cementos asfálticos. En 1990 SHRP incluyó un área mezclas asfálticas, diseñada sobre el trabajo del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) sobre el Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS) y el trabajo del LCPC en Francia. El AAMAS se condujo bajo el proyecto 9-06 del NCHRP y los investigadores principales fueron Harold L. Von Quintus y Brent Rauhut. La mayoría de las pruebas de mezclas durante el SHRP por el Asphalt Institute se enfocaron a modificar el compactador giratorio de 6 pulgadas de Texas”.



IMAGEN N° 31. Compactador giratorio Superpave (SCG).

“Diversas investigaciones del FHWA sobre este dispositivo mostraron un ángulo de giro del molde de 1.23° y no de un grado como originalmente se deseaba”. Los investigadores encargados del SHRP especificaron finalmente para el compactador giratorio SHRP (Imagen N° 31), lo siguiente:

- Presión de consolidación vertical 600 kPa.
- Ángulo de giro 1.25° .
- Velocidad de giro 30 rpm.

“El primer compactador giratorio australiano, el Giropac, se produjo en 1992, con el fin de lograr estos requerimientos. Después de un periodo de investigación y desarrollo de las normas australianas para la preparación de especímenes asfálticos por medio de compactación giratoria, hizo que un número de autoridades estatales de carreteras aprobaran reemplazar el método de compactación Marshall de sus normas de especificación de asfaltos”.

“Cuando se intentó operar el Gyropac para un ángulo más bajo y presión vertical especificada por SHRP (1.25° y 600 kPa, respectivamente), se encontró con mezclas rígidas y que los componentes de las máquinas se doblaban bajo las cargas, causando que el ángulo de giro se redujera durante la compactación”.



“El segundo compactador giratorio australiano, el SERVOPAC, es un servocontrolador del compactador giratorio diseñado para aplicar una presión vertical de compresión estática a un espécimen asfáltico, aunque se aplique simultáneamente un movimiento giratorio a un molde cilíndrico que contiene el asfalto”.

“El SERVOPAC se diseñó para compensar automáticamente el ángulo de giro (bajo servo control de realimentación) y así mantener el ángulo de giro constante durante la compactación; además provee un recurso para un ajuste simple y rápido de los parámetros críticos. El servo control de realimentación está habilitado para brindar más precisión y resultados consistentes; es una herramienta potente para evaluar los parámetros fijados y permite un ajuste para trabajos siguientes, indicando los parámetros que serán cambiados. Un aditamento más reciente es la medición de la resistencia al corte. Esto se logra con la instalación de un transductor de presión en las líneas de presión de los tres puntos giratorios actuantes. A través de un algoritmo similar al usado con la máquina GTM, el promedio de la presión medida por ciclos, es trasladada en resistencia al corte (Imagen N° 32)”



IMAGEN N° 32.

**Compactador giratorio
australiano (SERVOPAC)**

**Fuente: Instituto Mexicano del
Transporte. Publicación técnica
N° 228**



Capítulo 2

METODOLOGÍA



2. METODOLOGÍA

2.1 INTRODUCCIÓN

El propósito de la construcción de pavimentos con mezcla asfáltica es el de asegurar una superficie de rodadura muy confortable para el usuario y que su estructura soporte la mayor parte de las cargas de los vehículos y trasladar el resto de estas al terreno de subrasante, para ello se deben cumplir con los requerimientos técnicos del proyecto mediante una adecuada implementación de las especificaciones de construcción dadas por diversas entidades estatales y privadas, como es el caso del INVIAS para Colombia.

Dando cumplimiento a los objetivos de la investigación, se realizó el análisis de trabajabilidad y se evaluó el efecto de la compactación adicional bajo condiciones de servicio en el cambio volumétrico de las mezclas asfálticas en caliente como mecanismo para medir la susceptibilidad de las diferentes mezclas a la densificación adicional por circulación del tránsito pesado.

Se presenta a continuación paso a paso la secuencia que se llevó a cabo para el desarrollo de la investigación, con la que se espera, además, de los resultados y conclusiones de acuerdo con los objetivos propuestos, se constituya en un ejercicio didáctico de aplicación para las condiciones particulares de los materiales Colombianos y especificaciones vigentes y que proporcione elementos para tomar decisiones acertadas durante la actividad de diseño, y del proceso constructivo de la mezcla.



2.2 SECUENCIA DE ACTIVIDADES

- 1º. Documentación bibliográfica relacionada con las mezclas asfálticas en particular en lo referente al los materiales constitutivos, el diseño, la volumetría, las bondades y desventajas de los contenidos de vacíos de aire, los sistemas de compactación y especificaciones de construcción existentes.
- 2º. Conceptualización y análisis de las relaciones volumétricas consideradas en las mezclas asfálticas.
- 3º. Selección de las normas de ensayos de laboratorio a seguir y de procedimientos para diseño de mezclas asfálticas en caliente conforme a las especificaciones dadas por el INV y la normativa SHRP.
- 4º. Selección de los agregados pétreos y el ligante asfáltico y determinación de las cantidades necesarias para la ejecución del estudio.



IMAGEN N° 33. Agregados de trabajo

Los agregados usados en esta investigación son procesados ya que estos han sido triturados y cribados. Su origen es de gravas naturales de ríos: Dos Ríos, Galíndez y El Pílon ubicados en el municipio del Patía (Cauca), que son trituradas y seleccionados para que satisfagan los estándares de forma, angularidad y granulometría exigidos por INV para la elaboración de una mezcla asfáltica. La cantidad requerida fue de tres metros cúbicos, cantidad importante



para poder contar con una fuente de suministro suficiente, dado que se debían reproducir gradaciones diferentes a la enviada por la empresa “Corredores viales 2”, quien amablemente suministro el material, es importante anotar que el origen del agregado pétreo en el estudio va a ser una constante.



IIIMAGEN N° 34. Tamizado de agregados

La separación por tamaños y combinaciones sistemáticas de las diferentes fracciones de los materiales, después de triturarlos, da como resultado una granulometría que debe cumplir con las especificaciones y con la recomendación de la formula de trabajo. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad consiste en mantener gradaciones específicas de agregados. Durante la etapa de diseño en el laboratorio se tiene que ser igual de cuidadoso en el manejo de las diferentes fracciones que compondrán la granulometría de la formula de trabajo.



IMAGEN N° 35. Separación en tamaños



IMAGEN N° 36. Almacenamiento y referenciación



El cemento asfáltico empleado en el desarrollo de esta investigación es producido en la actualidad en la refinería de Barrancabermeja. Se escogió este asfalto porque es el más utilizado en esta región del país y además, es relativamente blando y por lo tanto se supone que las mezclas elaboradas con este material tendrán una mayor susceptibilidad a la compactación adicional por efecto del tránsito pesado sobre todo en proyectos ubicados en climas cálidos. Para el estudio se requirieron cinco galones de un mismo despacho realizado por la planta de asfalto y trituración de “Galindez” de propiedad de la firma “Corredores Viales 2”, ubicada en el municipio del Patía (Cauca), quienes amablemente lo suministraron. Se debe anotar que el tipo de asfalto empleado fue una constante durante este estudio.



IMAGEN N° 37. Cemento asfáltico (ligante) de trabajo

5º. Selección de las tres (3) gradaciones de trabajo.



IMAGEN N° 38. Gradaciones de trabajo



IMAGEN N° 39. Fracciones granulométricas



La selección de las gradaciones de trabajo se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Incluir una gradación *tipo densa* de uso generalizado en el país.
- Incluir una gradación *tipo semi-densa*, incorporadas en las especificaciones del INV-07, porque este tipo de granulometrías están siendo utilizadas en el mundo para disminuir la tendencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas.
- Incluir una gradación *tipo Superpave*, teniendo en cuenta que en la selección de los requerimientos granulométricos la investigación SHRP ha sido especialmente cuidadosa y pretende proporcionar a las mezclas asfálticas, un esqueleto mineral adecuado, que les disminuya la tendencia al ahuellamiento.
- Seleccionarlas tres granulometrías con igual tamaño máximo.

CUADRO N° 4. Gradaciones de trabajo (ver anexo A)

TAMIZ	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 8	N° 10	N° 40	N° 80	N° 200
% PASA MDC-2	100	81.6	78.4	58.7		38.9	21.1	14.7	8.1
% PASA ESPECIFICACIÓN	100	80-95	70-88	49-65		29-45	14-25	8-17	4-8
% PASA SUPERPAVE	100	92.2	66.2	39.3	32.8		18.5	10.7	7.7
% PASA PUNTOS DE CONTROL	MIN 100	MIN. 90 MAX. 100	MAX. 90		MIN. 28 MAX. 58				MIN. 2 MAX 10
% PASA MSC-2	100	87.9	73.7	48.4		33.3	16.3	10.6	6.8
% PASA MSC-2-A	100	82.7	74.4	52.4		36.1	17.9	12.5	7.7
% PASA ESPECIFICACIÓN	100	80-95	65-80	40-55		24-38	9-20	6-12	3-7



Las gradaciones seleccionadas cumplirán con los estándares establecidos en las siguientes especificaciones:

- **Densa** para mezcla MDC-2, artículo 450-07 INV.
- **Semi-densa** para mezcla MSC-2, artículo 450-07 INV.
- **Superpave** para mezcla de tamaño máximo nominal 12.5 mm.

6º. Caracterización de agregados.

Las propiedades analizadas en esta investigación de los agregados son las básicas para garantizar que el material seleccionado cumple con los estándares de calidad y las requeridas para efectuar los cálculos volumétricos de las mezclas compactadas. (Ver anexo B):

- Gravedad específica.
- Angularidad.
- Desgaste.
- Solidez.
- Índice de Partículas largas y planas.
- Densidad en Tolueno del material llenante.

Para la fabricación de las diferentes mezclas asfálticas se trabajó con el agregado utilizado por “La Planta de Asfalto y Trituración de Galindez”, cuyas fuentes son: Dos Ríos, Galindez y El Pilon. El agregado se caracterizó con base en los criterios de SUPERPAVE, las especificaciones de construcción del INV (art. 450-07) y las normas de ensayo del INV.E-2007.



CUADRO N° 5. Resumen de resultados de ensayos de laboratorio

PROPIEDAD	FRACCIONES ANALIZADAS	NOMENCLATURA EMPLEADA	MDC-2	SUPERPAVE	MSC-2	ESPECIFICACION INVIAS
Gravedades específicas y Absorción	Agregado Grueso Norma INV E-223-07	Gsa	2.70	2.69	2.70	--
		Gsb	2.64	2.64	2.64	--
		Gsb sss	2.66	2.66	2.66	--
		Absorción (%)	0.90	0.80	0.90	--
Gravedades específicas y Absorción	Agregado Fino Norma INV E-222-07	Gsa	2.70	2.71	2.70	--
		Gsb	2.63	2.63	2.63	--
		Gsb sss	2.66	2.66	2.66	--
		Absorción (%)	1.00	1.00	1.00	--
Gravedad específica	Llenante Mineral Norma INV E-128-07	Gs	2.754	2.754	2.754	--
Partículas fracturadas mecánicamente	Agregado Grueso Norma INV E-227-07. 1 cara/2 caras	P (%)	68.4/62.2	66.8/58.1	70.2/62.8	85/70
Angularidad	Agregado Fino Norma INV E-239-07 Método A	Vv (%)	44.2	44.2	44.2	45% min.
Desgaste en la Máquina de los Ángeles	Agregado Grueso. Norma INV E-218-07 y Norma INV E-219-07. Gradación B	Desgaste (%)	23.2	23.2	23.2	25% máx.
Perdidas en el ensayo de Solidez	Agregado Grueso Norma INV E-220-07 Sulfato de Magnesio	Pérdida Total Solidez (%)	3.4	3.0	3.3	18% máx.
Perdidas en el ensayo de Solidez	Agregado Fino Norma INV E-220-07 Sulfato de Magnesio	Pérdida Total Solidez (%)	7.0	7.2	7.3	18% máx.
Densidad aparente en Tolueno	Llenante Mineral Norma INV E-225-07	γ_B (g/cm ³)	0.9	0.9	0.9	-
Índice de aplanamiento y de alargamiento	Agregado Grueso Norma INV E-230-07	I _A	16.8	17.3	15.2	35%
		I _L	27.0	23.2	24.5	



7º. Caracterización del ligante asfáltico.

Se efectuaron las pruebas para evaluar las propiedades físicas del asfalto requeridas para el manejo del ligante en el laboratorio y para los cálculos volumétricos. (ver anexo B)

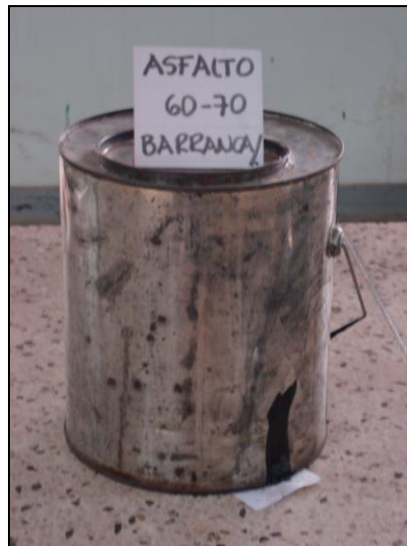


IMAGEN N° 40. Cemento asfáltico 60-70

En este estudio se trabajó con cemento asfáltico con grado de penetración 60-70 procedente del complejo industrial de Barrancabermeja, al cual se le realizaron los siguientes ensayos de caracterización física:

- Viscosidad.
- Gravedad específica.

Se midió la viscosidad del ligante asfáltico para evaluar su manejabilidad a altas temperaturas, a través del viscosímetro Brookfield (viscosímetro cilíndrico coaxial rotacional), mediante el procedimiento de ensayo descrito en la norma INV E-717-07. En este equipo se mide la viscosidad del ligante asfáltico a altas temperaturas con el objetivo de asegurar la suficiente fluidez durante las operaciones de bombeo y mezcla, por lo tanto se determina sobre el asfalto sin envejecer y no debe de acuerdo a las especificaciones SUPERPAVE, ser superior a los 3 Pa.s para 135°C. Se mide mediante un cilindro concéntrico que se introduce en la



muestra asfáltica y se hace girar. El equipo mide el torque necesario para producir un giro de 20 rpm y determina automáticamente la viscosidad del asfalto. Se puede decir que el viscosímetro rotacional reemplaza a los capilares y que mide las propiedades del asfalto en su estado líquido (Newtoniano). A través de este equipo se puede también obtener el diagrama de viscosidad- temperatura (curva reológica) que sirven para estimar las temperaturas de mezcla y compactación a utilizar en la dosificación de las mezclas asfálticas.

Se determinaron cuatro viscosidades para igual número de temperaturas obteniendo del diagrama de viscosidad – temperatura las temperaturas de trabajo: la de mezclado será la temperatura a la cual se calentará el cemento asfáltico para producir una viscosidad de 1.70 ± 20 Poises y la de compactación será la temperatura a la cual deberá calentarse el cemento asfáltico para que tenga una viscosidad de 2.80 ± 20 Poises, ver figura N° 15.

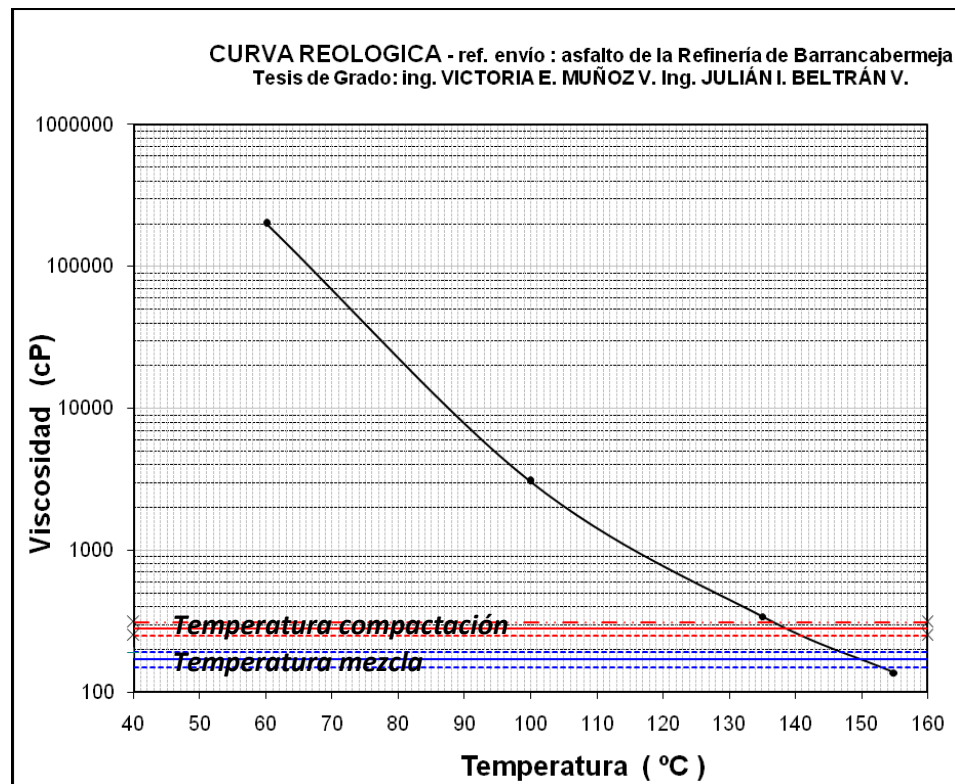


FIGURA N° 15. Curva reológica del asfalto utilizado



La gravedad específica se determinó usando el método de picnómetro según norma INV. E-707-07, siendo 1.0115 el valor obtenido para el ligante trabajado a 25°C.

8º. Selección de los tres (3) Índices de Espesor de Película de Ligante (IPL de trabajo: 6.8, 7.2 y 7.7) y determinación del porcentaje de ligante (% Pb).

Para seleccionar la cantidad de asfalto se utilizó el criterio de IPL, porque, se consideró que al proporcionar cantidades de asfalto que permitieran mezclas con espesores de película de ligante semejantes, se colocarían a las diferentes mezclas evaluadas en el estudio, en condiciones equivalentes de trabajabilidad dado que material asfáltico, a temperatura de compactación, es el que actúa como lubricante que facilita el movimiento de las partículas de agregado tanto en el proceso de compactación durante la elaboración de la capa asfáltica como en la compactación adicional por efectos del tránsito pesado.

El procedimiento de cálculo para determinar el índice de película de asfalto o espesor de película de ligante en metros, que cubre el agregado, se describe en la norma INV E-741-07.

Los IPL considerados en esta investigación se establecieron tomando como referencia en primer lugar los criterios de comprobación de diseño volumétrico de la formula de trabajo dados en las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, IDU-ET-2005, Sección 510-05 - Mezclas Asfálticas en Caliente Densas, Semi-densas y Gruesas, tabla 510.8, en segundo lugar la recomendación dada por el INV en el Artículo 450-07 para el IPL de la mezcla con la formula óptima de trabajo y por último, considerando los IPL calculados en mezclas asfálticas que han sido usadas en algunos proyectos, tal como se muestra en el cuadro N° 6.

La mezcla MDC-2 ₁, es una mezcla procedente de la planta de asfalto y trituración La Leonera localizada en Andalucía (Valle), la cual se elaboró con grava triturada, arena de trituración, arena natural procedente del Río Bugalagrande y asfalto AC-20 de la Shell.

La mezcla MDC-2 ₂, es una mezcla que se utilizó en Junio de 2005 en el mantenimiento integral de la vía Rumichaca – Pasto - Mojarras, la cual se elaboró con grava triturada, arena de



trituration, procedentes de la cantera del Río Tellez (Nariño) y asfalto sólido AC-80-100 de Barrancabermeja.

La mezcla MDC-2₃, es una mezcla procedente de la planta Agremezclas que se utilizó en septiembre de 2005 en la pavimentación de la vía Padilla - El Barranco – Corinto (Cauca), la cual se elaboró con material de arrastre del río Pance, arena del río Cauca y asfalto sólido AC-60-70 de Apiay.

La mezcla MDC-2₄, es una mezcla que se elaboró en laboratorio para diseño Marshall en Febrero de 2007 con materiales de la cantera del río Tellez (Nariño) y asfalto sólido AC-80-100 de Barrancabermeja.

CUADRO N° 6. Datos de cálculo de IPL de algunas mezclas trabajadas en Colombia

DATOS	TIPO DE MEZCLA	MDC-2₁	MDC-2₂	MDC-2₃	MDC-2₄	MDC-2₅	MDC-2₆
Área superficial del agregado combinado, m ² /kg. (A)		6.37	6.84	5.84	6.44	6.82	5.98
Densidad bulk combinada del agregado, t/m ³ . (Dsb)		2.884	2.781	2.812	2.603	2.792	2.663
Contenido de asfalto total, %. (Pb)		5.30	5.30	5.10	5.50	5.20	5.20
Gravedad específica efectiva del agregado. (Gse)		2.920	2.814	2.881	2.694	2.830	2.742
Gravedad específica máxima teórica. (Gmm)		2.653	2.569	2.635	2.471	2.588	2.516
Contenido de asfalto absorbido, %. (Pba)		0.43	0.42	0.83	1.33	0.49	1.09
Contenido de asfalto efectivo, %. (Pbe)		4.89	4.90	4.28	4.25	4.74	4.17
Densidad del ligante a 25°C, t/m ³ . (Db)		1.007	1.006	1.017	1.021	1.011	1.004
Índice de película de ligante, m. (IPL)		8.77	7.90	8.06	6.72	7.71	7.36



La mezcla MDC-2₅, es una mezcla que se elaboró en laboratorio para diseño Marshall en Febrero de 2007 con materiales de la cantera del río Tellez (Nariño) y asfalto sólido AC-60-70 de Apiay.

La mezcla MDC-2₆, es una mezcla procedente de la planta de asfalto y trituración de Galindez, cuyas fuentes de agregados son: Dos Ríos, Galindez y El Pílon, y que actualmente se utiliza en las obras de mantenimiento integral de la vía Mojarras – Popayán, la cual además se elabora con asfalto sólido AC-60-70 de Barrancabermeja.

Basados en estas consideraciones se emplearon en esta investigación los IPL de 6.8, 7.2 y 7.7, que difirieron de los planteados inicialmente en el proyecto (7, 8 y 9), con los cuales se procedió a determinar el porcentaje de asfalto, Pb, correspondiente a cada uno, de la siguiente forma:

Una vez definida la granulometría y el IPL, se procedió a estimar la gravedad específica efectiva del agregado (Gse), a partir de la determinación de la gravedad específica máxima teórica (Gmm) de mezclas elaboradas con el mismo agregado, la misma granulometría y un determinado Pb. Luego se realizó el cálculo del porcentaje de asfalto absorbido, Pba, en función de la gravedad específica del agregado combinado (Gsb), Gse y la densidad del ligante (Gb) y se calculó también el porcentaje de asfalto efectivo, Pbe, para el IPL fijado en función del Pba y por último se determinó el Pb con base en el Pbe calculado y el Gse estimado, valor que sirvió para la elaboración de las diferentes mezclas cada una con su respectivo IPL, ver cuadro N° 7. Es importante anotar que una vez se elaboraron las mezclas con los Pb calculados, se les midió la densidad máxima teórica, Gmm, y se recalcó el IPL.



CUADRO N° 7. Datos de cálculo de los IPL de las mezclas trabajadas en la investigación

TIPO DE MEZCLA DATOS	MDC-2			SUPERPAVE			MSC-2			MSC-2-A	
Área superficial del agregado, m ² /kg. (A)	7.61			6.63			6.25			7.01	
Densidad bulk agregado, t/m ³ . (Gsb)	2.641			2.642			2.645			2.645	
Porcentaje de asfalto, % (Pb)	5.50	5.80	6.10	4.70	4.90	5.20	4.55	4.78	5.07	4.25	4.50
Gravedad efectiva del agregado. (Gse)	2.684	2.680	2.677	2.665	2.665	2.665	2.677	2.677	2.677	2.677	2.675
Gravedad máxima teórica a 25°C. (Gmm)	2.460	2.446	2.433	2.475	2.467	2.456	2.490	2.482	2.471	2.502	2.491
Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)	0.61	0.56	0.52	0.33	0.33	0.33	0.46	0.46	0.46	0.46	0.43
Contenido de asfalto efectivo, % (Pbe)	4.933	5.273	5.610	4.385	4.586	4.886	4.111	4.342	4.633	3.81	4.09
Densidad del ligante 25°C, t/m ³ . (Gb)	1.0115										
Índice de película, m. (IPL)	6.80	7.20	7.70	6.80	7.20	7.70	6.80	7.20	7.70	5.70	6.00

9º. Elaboración de las mezclas para cada granulometría seleccionada y acondicionamiento a corto plazo.

a. Elaboración de mezclas.

Las diferentes mezclas se elaboraron siguiendo el procedimiento establecido en la norma INV E-748-07, apartes 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, que a continuación se resume:

i. Preparación del agregado.

El método requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos para ello deberán ser secados hasta peso constante a una temperatura de 105 y 110°C Una muestra de gradación para la fabricación de un espécimen de mezcla requerirá de aproximadamente 1200 gr, separados por



tamizado en los tamaños deseados, con el fin de obtener alturas de las probetas cercanas a 63.5 ± 1.3 mm, tal como lo recomienda la norma en mención.



IMAGEN N° 41. Secado de agregados



IMAGEN N° 42. Pesadas para elaboración de mezclas

Una vez el material está seco, el agregado deberá ser calentado en horno o estufa a una temperatura de 28°C , por encima de la temperatura de compactación, en el momento de la preparación de la mezcla.



IMAGEN N° 43. Calentamiento de agregados para elaboración de mezclas

ii. Preparación del ligante.

La temperatura a la cual se deberá calentar el cemento asfáltico para las mezcla será la requerida para producir una viscosidad de 1.70 ± 0.20 Centipoises, y la temperatura a la cual



deberá calentarse para que tenga una viscosidad de 2.80 ± 0.30 Centipoises, será la temperatura de compactación.



IMAGEN N° 44. Calentamiento del asfalto para que adquiera la viscosidad de mezclado

iii. Mezcla de agregados y ligante.

Las probetas de ensayo de las mezclas contempladas son preparadas haciendo que cada una contenga la cantidad de asfalto (Pb) que corresponda al IPL estimado, siguiendo la siguiente secuencia de preparación:

- El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.



IMAGEN N° 45. Proceso de mezclado de los agregados y el ligante.



- Las mezclas asfálticas calientes se colocan en bandejas separadas para cada probeta a elaborar (igual gradación e IPL), en las que la mezcla se distribuye uniformemente con un espesor comprendido entre 25 y 50 mm.



IMAGEN N° 46. Disposición de la mezcla en bandeja para la elaboración de especímenes.

Este procedimiento se llevó a cabo para cada uno de los 315 especímenes fabricados en el desarrollo de esta investigación. En el cuadro N° 8, se resumen el número de especímenes de trabajo utilizados en cada combinación de gradación, IPL y contenido de vacíos (Va).

CUADRO N° 8. Número de especímenes de trabajo elaboradas para % de Va comprendidos entre 3.5 y 7.5

IPL	TIPO DE MEZCLA	MDC-2	SUPERPAVE	MSC-2	MSC-2-A	Totales
	IPL=6.8	42	23	19		84
	IPL=7.2	42	26	18		86
	IPL=7.7	29	29	18		76
	IPL=5.7				37	37
	IPL=6.0				19	19
						302



Además del número de mezclas elaboradas para la fabricación de especímenes de ensayo, también se prepararon las mezclas, necesarias para la determinación del Gmm de acuerdo con la norma INV E-735-07, con una cantidad aproximada de 2220 gr de agregado para cada determinación.



IMAGEN N° 47. Disposición de la mezcla en bandejas para la determinación del Gmm

- b. Acondicionamiento de las mezclas para simular la absorción de asfalto en campo y envejecimiento a corto plazo, de acuerdo a la norma AASHTO R 30-02.*

El acondicionamiento a corto plazo se emplea para medir las propiedades mecánicas de las mezclas y es un procedimiento diseñado para simular el mezclado en planta y los efectos de la construcción en las mezclas asfálticas en caliente.



IMAGEN N° 48. Acondicionamiento de las mezclas a corto plazo.



El procedimiento de acondicionamiento se resume a continuación: una vez cada mezcla (igual gradación e IPL) ha sido colocada en las bandejas, se llevan estas a un horno ventilado previamente calentado y controlado termostáticamente, a una temperatura de $135^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 4 horas \pm 5 minutos. Este proceso se realizó a las 315 mezclas elaboradas para la fabricación de igual número de especímenes de ensayo y a las mezclas requeridas para la determinación del Gmm.

- 10º.** Determinación de la gravedad específica máxima teórica (Gmm) de las mezclas para cada combinación de gradación e IPL, de acuerdo a la norma INV E-735-07. (Ver anexo C).

La gravedad específica máxima teórica es una propiedad fundamental de los pavimentos, cuyo valor está afectado por la composición de la mezcla en términos de tipo y cantidad de agregados y de los materiales asfálticos. Este valor es usado para calcular el porcentaje de vacíos de aire con respecto al volumen total (V_a), en una mezcla asfáltica compactada y para calcular la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos del agregado en una mezcla asfáltica en caliente.

El procedimiento para medir el Gmm se resume a continuación: una muestra de mezcla asfáltica suelta de peso conocido (aproximadamente 2220 gr), previamente acondicionada conforme a la norma AASHTO R 30-02, se coloca en un recipiente de vacío tarado con antelación, posteriormente se procede a adicionar agua destilada a una temperatura de 25°C hasta que la muestra en el recipiente quede sumergida totalmente, luego se aplica un vacío gradual de 30 mm de Hg y se mantiene por un tiempo de 15 ± 2 minutos. Una vez transcurrido este periodo de tiempo el volumen de la muestra de mezcla asfáltica se obtiene llenando el recipiente de vacío hasta la línea de enrase con agua destilada o totalmente y enrasando con la tapa y seguidamente se pesa en el aire. En este momento se miden la temperatura y se pesa el recipiente con muestra asfáltica, agua hasta línea de enrase o hasta el tope y con tapa de enrase. Conocidas estos datos se procede a calcular la gravedad específica máxima teórica (Gmm) a 25°C , para cada combinación de gradación e IPL, ver cuadro N° 9.



IMAGEN N° 49. Pesada de muestra de mezcla asfáltica para medición de Gmm.



IMAGEN N° 50. Acondicionamiento de muestras de mezcla asfáltica para medir Gmm.



IMAGEN N° 51. Equipo para la determinación del Gmm.

CUADRO N° 9. Valores de Gmm de las mezclas trabajadas

TIPO DE MEZCLA PARAMETROS	MDC-2			SUPERPAVE			MSC-2			MSC-2-A	
	Porcentaje de asfalto, (Pb)	5.50	5.80	6.10	4.70	4.90	5.20	4.55	4.78	5.07	4.25
Índice de película de ligante, m. (IPL)	6.80	7.20	7.70	6.80	7.20	7.70	6.80	7.20	7.70	5.70	6.00
Gravedad máxima teórica a 25°C. (Gmm)	2.460	2.446	2.433	2.475	2.467	2.456	2.490	2.482	2.471	2.502	2.491



11º. Elaboración de especímenes.

Las mezclas una vez han sido acondicionadas se compactan utilizando el compactador giratorio Superpave (SCG), siguiendo el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 312-04, aparte 9.



IMAGEN N° 52. Compactador giratorio Superpave (SCG).

Para cada combinación de gradación e IPL se elabora inicialmente un espécimen (briqueta) de ajuste, la cual es compactada en el SCG aplicando los giros máximos dados en la norma AASHTO R 35-04, aparte 8 - tabla 1, para tránsito pesado (205 giros), con el fin de obtener los parámetros de volumetría con los cuales queda el espécimen y con base en estos determinar los giros requeridos para obtener unas condiciones de vacíos de aire (V_a) iniciales que se necesitaran en el desarrollo de esta investigación.

El procedimiento de compactación se resume así: con la mezcla acondicionada y el molde de compactación Superpave previamente calentado a la temperatura de compactación (135°C), se coloca un disco de papel y se procede a depositar la mezcla en el molde tratando de no producir segregación en ella, para lo cual se emplea un embudo y la mezcla es homogenizada antes de ser vertida, posteriormente se nivela la mezcla, se coloca en el centro de la misma y a igual profundidad un termómetro con el fin de realizar un control adecuado de la temperatura de compactación. Una vez controlada la temperatura se extrae el termómetro y se coloca un disco de papel en la parte superior de la mezcla dentro del molde y se procede a llevar el conjunto de molde y mezcla al compactador SCG, el cual se debe haber preparado con



antelación introduciendo en su software de trabajo los parámetros de compactación: presión de compactación de 600 ± 18 kPa; ángulo de giro externo del plato base de $1.25 \pm 0.02^\circ$, número de revoluciones por minuto del plato de 30 ± 0.5 y número de giros seleccionado. Terminada la compactación (aplicación del número de giros especificado), se retira de la máquina el conjunto de molde y mezcla y se lleva al extractor. Los especímenes se referencian y se colocan sobre una superficie plana, limpia, no absorbente, libre de posibles golpes y contaminaciones por un periodo de 24 horas.

De esta forma se elaboraron los 315 especímenes, de los cuales fueron utilizados para esta investigación 302, con % de Va comprendidos entre 3.5 y 7.5, ver cuadro 8.



IMAGEN N° 53. Molde de compactación

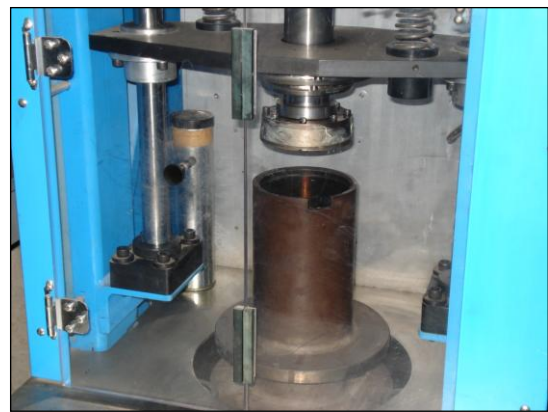


IMAGEN N° 54. Compactación de la mezcla



IMAGEN N° 55. Extracción del espécimen del molde de compactación



IMAGEN N° 56. Especímenes elaborados para las diferentes combinaciones de gradación, IPL y % de Va

12º. Determinación de la gravedad específica bulk (Gmb) de los especímenes compactados.

Pasadas 24 horas se determina la gravedad específica bulk a 25°C (Gmb) de cada espécimen compactado, siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV E 733-07. (Ver anexo D).

La determinación del Gmb se requiere para el cálculo de los vacíos de aire (Va) en mezclas asfálticas compactas y también permite establecer el grado relativo de compactación.



FIGURA N° 57. Determinación del peso en el agua de cada espécimen para la medición del Gmb.

El procedimiento para determinar el Gmb se resume a continuación: a cada espécimen se le determina su masa seca después de que han transcurrido 24 horas luego de su compactación,



seguidamente se sumerge en un baño de agua cada uno a 25°C por 4 ± 1 minutos y luego se determina su masa en el agua, posteriormente se seca superficialmente el espécimen con una toalla húmeda y se registra su masa (masa del espécimen en estado saturado y con superficie seca), la diferencia entre estas dos masas (masa en agua y la masa saturada con superficie seca) se emplea para medir la masa de un volumen igual de agua a 25°C. Con estos datos se procede a calcular la gravedad específica bulk (Gmb), ver cuadro N° 10 y anexo D.

- 13º.** Fabricación de especímenes con la volumetría requerida, teniendo como guía la información obtenida en el espécimen de ajuste, (N° de giros versus Va), para cada combinación de gradación e IPL.

Tal como se mencionó en el aparte 11 de este capítulo, se elaboró un espécimen (briqueta) de ajuste a giros como guía para obtener el número de giros necesarios para lograr unas condiciones de vacíos de aire iniciales establecidos (Va planteados en el proyecto: 4, 5, 6 y 7), las cuales como veremos más adelante fueron modificadas. El número de giros obtenido en esta briqueta de ajuste para una condición dada de % de Va será aplicado a cada mezcla en el SCG.



IMAGEN N° 58. Briquetas de ajuste.



CUADRO N° 10. Datos obtenidos en laboratorio para la determinación del Gmb y % de Va inicial, de los especímenes elaborados con gradación MDC-2 e IPL de 6.8

IPL = 6,8			%Pb = 5,5					Gmm = 2,460					
GRADACIÓN MDC-2													
B-#	Nº Giros	T. C (°C)	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va inicial	Observac.
			h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb		
OA	200	135	6.88	6.86	6.87	6.89	6.88	1163.2	679.8	1167.7	2.384	3.1	Ajuste a giros
A	200	135	6.12	6.12	6.10	6.09	6.11	1155.7	682.7	1155.8	2.443	0.7	Ajuste a giros
1	107	135	6.34	6.34	6.33	6.36	6.34	1165.4	679.6	1167.1	2.391	2.8	
2	107	135	6.26	6.27	6.28	6.27	6.27	1167.6	684.0	1168.1	2.412	2.0	
3	107	135	6.38	6.36	6.36	6.37	6.37	1173.5	685.3	1174.5	2.399	2.5	
4	107	135	6.33	6.35	6.36	6.33	6.34	1166.6	681.2	1168.8	2.393	2.7	
5	107	135	6.37	6.36	6.38	6.38	6.37	1162.3	678.5	1165.5	2.387	3.0	
6	107	135	6.33	6.32	6.34	6.34	6.33	1167.0	680.9	1168.2	2.395	2.6	
7	69	135	6.50	6.51	6.52	6.48	6.50	1161.8	665.1	1166.4	2.318	5.8	
8	69	135	6.40	6.39	6.41	6.41	6.40	1162.6	672.5	1164.4	2.363	3.9	
9	69	135	6.41	6.42	6.41	6.40	6.41	1169.9	679.3	1172.4	2.373	3.6	
10	69	135	6.35	6.34	6.35	6.36	6.35	1158.4	672.3	1160.1	2.375	3.5	
11	69	135	6.39	6.38	6.38	6.40	6.39	1169.0	678.5	1171.0	2.374	3.5	
12	69	135	6.36	6.37	6.35	6.36	6.36	1164.0	675.5	1165.7	2.375	3.5	
13	44	135	6.61	6.64	6.63	6.57	6.61	1171.5	672.6	1176.1	2.327	5.4	
14	44	135	6.48	6.47	6.51	6.51	6.49	1165.6	672.2	1170.1	2.341	4.8	
15	44	135	6.48	6.50	6.47	6.44	6.47	1164.5	672.2	1167.4	2.352	4.4	
16	44	135	6.56	6.59	6.55	6.57	6.57	1165.7	669.0	1169.1	2.331	5.2	
17	44	135	6.53	6.57	6.53	6.54	6.54	1162.9	669.1	1167.5	2.333	5.2	
18	44	135	6.47	6.47	6.44	6.43	6.45	1164.2	672.0	1167.2	2.351	4.4	
19	30	135	6.55	6.54	6.55	6.55	6.55	1175.4	677.2	1177.0	2.352	4.4	
20	30	135	6.41	6.39	6.44	6.40	6.41	1169.5	676.4	1170.5	2.367	3.8	
21	30	135	6.49	6.50	6.47	6.43	6.47	1177.9	680.6	1180.0	2.359	4.1	
22	30	135	6.40	6.40	6.41	6.50	6.43	1160.7	669.9	1162.7	2.355	4.3	
23	30	135	6.44	6.43	6.41	6.40	6.42	1164.2	671.9	1165.6	2.358	4.1	
24	30	135	6.53	6.54	6.51	6.50	6.52	1165.3	669.9	1167.6	2.341	4.8	
56	20	115	6.70	6.67	6.68	6.69	6.69	1175.6	672.8	1178.3	2.326	5.5	
57	18	115	6.76	6.79	6.79	6.79	6.78	1168.6	659.9	1173.7	2.274	7.5	
58	20	115	6.67	6.68	6.68	6.68	6.68	1184.1	680.8	1187.3	2.338	5.0	
59	20	115	6.76	6.78	6.79	6.78	6.78	1176.7	669.1	1182.9	2.290	6.9	
60	20	110	6.74	6.75	6.74	6.75	6.75	1169.6	669.0	1176.5	2.305	6.3	
61	20	110	6.80	6.80	6.81	6.80	6.80	1166.5	660.8	1173.7	2.274	7.5	
62	20	110	6.76	6.78	6.79	6.78	6.78	1178.1	673.1	1184.6	2.303	6.4	
63	19	115	6.75	6.78	6.77	6.78	6.77	1171.0	660.8	1175.2	2.276	7.5	
64	19	115	6.85	6.86	6.85	6.86	6.86	1171.4	658.9	1177.6	2.258	8.2	
65	19	115	6.78	6.80	6.78	6.76	6.78	1173.5	664.8	1178.4	2.285	7.1	
66	20	110	6.70	6.71	6.69	6.72	6.71	1156.9	651.9	1161.2	2.272	7.7	



Para obtener la información que se requiere de volumetría de la briqueta de ajuste es necesario acceder a información básica que genera el SCG a través de datos que se le suministran, correspondientes a parámetros de diseño y del proyecto, tales como: Gmm de la mezcla; número, masa seca y Gmb del espécimen compactado; número del proyecto y número de la mezcla de diseño. Cuando estos datos son introducidos al software del SCG este los procesa y arroja información que puede ser impresa, la cual permite visualizar la variación de alturas en el espécimen cuando se aplica cada giro de compactación y los % de Gmm para los giros iniciales, giros de diseño y giros máximos conforme a los estándares dados en la tabla 1 de la norma AASHTO R 35-04, en función del nivel de tránsito (millones de ESALs), tal como se muestra en el cuadro N° 11 y N° 12 (ver anexo E).

CUADRO N° 11. Porcentaje de Gmm para los giros iniciales, de diseño y máximos en una “briqueta de ajuste a giros” con gradación MDC-2 e IPL de 6.8.

Información arrojada por el SCG

TROXLER GYRATORY COMPACTOR						
GYRATORY COMPACTOR SAMPLE INFORMATION						
Project Number.						
Maximun Specific Gravity.	Gmm	2.460				
Gyrations:	N _{Initial} =	9	N _{Desingn} =	124	N _{Maximun} =	200
Mix Design Number.						
Actual Asphalt Content						
Vertical Consolidation Pressure.	600 Kpa					
Sample Weight :	1252 g	Gmb:	2.384	Date:	10/09/2007	
Sample 1	Height	Gmb (est)	Gmb (corr)	% Gmm		
N ini	74.3	2.146	2.201	89.5		
N des	69.1	2.307	2.367	96.2		
N max	68.6	2.324	2.384	96.9		



CUADRO N° 12. Variación de alturas por giro aplicado en una “briqueta de ajuste a giros” con gradación MDC-2 e IPL de 6.8. Información arrojada por el SCG

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0A - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8									
GRDACIÓN MDC-2									
No DE GIROS	ALTURA (mm)	No DE GIROS	ALTURA (mm)	No DE GIROS	ALTURA (mm)	No DE GIROS	ALTURA (mm)	No DE GIROS	ALTURA (mm)
1	79.1	41	70.9	81	69.7	121	69.2	161	68.8
2	77.2	42	70.8	82	69.7	122	69.1	162	68.8
3	77.0	43	70.8	83	69.7	123	69.1	163	68.8
4	76.3	44	70.7	84	69.7	124	69.1	164	68.8
5	75.6	45	70.7	85	69.6	125	69.1	165	68.8
6	75.2	46	70.7	86	69.6	126	69.1	166	68.8
7	74.9	47	70.6	87	69.6	127	69.1	167	68.7
8	74.5	48	70.6	88	69.6	128	69.1	168	68.7
9	74.3	49	70.5	89	69.6	129	69.1	169	68.7
10	74.0	50	70.5	90	69.6	130	69.1	170	68.7
11	73.8	51	70.5	91	69.5	131	69.0	171	68.7
12	73.6	52	70.4	92	69.5	132	69.0	172	68.7
13	73.4	53	70.4	93	69.5	133	69.0	173	68.7
14	73.2	54	70.4	94	69.5	134	69.0	174	68.7
15	73.0	55	70.3	95	69.5	135	69.0	175	68.7
16	72.9	56	70.3	96	69.5	136	69.0	176	68.7
17	72.8	57	70.3	97	69.5	137	69.0	177	68.7
18	72.6	58	70.3	98	69.4	138	69.0	178	68.7
19	72.5	59	70.2	99	69.4	139	69.0	179	68.7
20	72.4	60	70.2	100	69.4	140	69.0	180	68.7
21	72.3	61	70.2	101	69.4	141	69.0	181	68.7
22	72.2	62	70.1	102	69.4	142	68.9	182	68.7
23	72.1	63	70.1	103	69.4	143	68.9	183	68.7
24	72.0	64	70.1	104	69.4	144	68.9	184	68.6
25	71.9	65	70.1	105	69.3	145	68.9	185	68.6
26	71.8	66	70.0	106	69.3	146	68.9	186	68.6
27	71.7	67	70.0	107	69.3	147	68.9	187	68.6
28	71.6	68	70.0	108	69.3	148	68.9	188	68.6
29	71.6	69	70.0	109	69.3	149	68.9	189	68.6
30	71.5	70	69.9	110	69.3	150	68.9	190	68.6
31	71.4	71	69.9	111	69.3	151	68.9	191	68.6
32	71.4	72	69.9	112	69.2	152	68.9	192	68.6
33	71.3	73	69.9	113	69.2	153	68.9	193	68.6
34	71.2	74	69.9	114	69.2	154	68.9	194	68.6
35	71.2	75	69.8	115	69.2	155	68.8	195	68.6
36	71.1	76	69.8	116	69.2	156	68.8	196	68.6
37	71.1	77	69.8	117	69.2	157	68.8	197	68.6
38	71.0	78	69.8	118	69.2	158	68.8	198	68.6
39	71.0	79	69.8	119	69.2	159	68.8	199	68.6
40	70.9	80	69.7	120	69.2	160	68.8	200	68.6



Debido a que el SCG trabaja con datos burdos (no considera cifras decimales) para el diámetro y masa seca del espécimen, por ejemplo el diámetro real de un espécimen es de 10.16 cm y la masa seca es de 1251.93 g, el SCG trabaja con diámetro de 10 cm y masa seca de 1252 g, se debe por lo tanto realizar un ajuste a la información para que esta sea más verídica, ver cuadro N° 13 y anexo F.



IMAGEN N° 59. Colocación de la mezcla en el molde de compactación



IMAGEN N° 60. Control de la temperatura de compactación

Como se puede observar en el cuadro N° 13, para lograr unos vacíos de aire iniciales (% Va) por ejemplo del 7 % (Gmm = 92.98%), son necesarios aproximadamente 30 giros que deben ser aplicados en el SCG para una mezcla MDC-2 e IPL de 6.8, previamente acondicionada y a una temperatura de compactación de 135°C.

Con base en los datos de las briquetas de ajuste a giros se procedió entonces a realizar la compactación de cada uno de las mezclas con el fin de obtener grupos de especímenes para cada combinación de gradación e IPL con porcentajes de vacíos de aire de 4, 5, 6 y 7, tal como se planteo inicialmente en el proyecto de investigación. Sin embargo al momento de reproducir la volumetría planteada con base en la información de la briqueta de ajuste, se encontró que esta actividad fue difícil de llevar a cabo debido a que no se lograban obtener los especímenes con los vacíos de aire requeridos, por más controles que se tuvieron durante el proceso de compactación en el SCG, como son temperatura del molde y de compactación; colocación de la mezcla en el molde; condiciones del equipo; entre otras, por lo que fue necesario en primer lugar realizar tanteos variando el número de giros y la temperatura de



compactación, aun así, continuaba presentándose gran dificultad en la obtención de los porcentajes de vacíos de aire (Va) establecidos, lo que retraso el cronograma de actividades sobre todo en la elaboración de especímenes para la mezcla MDC-2 y en segundo lugar se opto por trabajar, ya no con los porcentajes de vacíos de 4, 5, 6 y 7, si no con porcentajes de vacíos iniciales comprendidos entre 3.5 y 7.5, tratando de obtener especímenes con vacíos similares y en igual número para las diferentes combinaciones de gradación e IPL

De esta forma se lograron constituir grupos de mínimo 18 especímenes para cada combinación de gradación e IPL, lo cuales se subdividieron en 3 grupos para igual número de condiciones ambientales consideradas en el proyecto de investigación, cada uno con por lo menos 6 especímenes.



IMAGEN N° 61. Grupos de trabajo para la compactacion adicional



**CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica
corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros”**

con gradación MDC-2 e IPL de 6.8...

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0 - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8						
GRADACIÓN MDC-2						
No DE GIROS	ALTURA (mm)	Gmb est.	ALTURA corr.(mm)	Gmb corr.(gr/cm³)	% Gmm	
1	79.1	1.952	74.687	2.068	84.05	
2	77.2	2.000	72.893	2.118	86.11	
3	77.0	2.005	72.705	2.124	86.34	
4	76.3	2.024	72.044	2.143	87.13	
5	75.6	2.043	71.383	2.163	87.94	
6	75.2	2.053	71.005	2.175	88.41	
7	74.9	2.062	70.722	2.183	88.76	
8	74.5	2.073	70.344	2.195	89.24	
9	74.3	2.078	70.155	2.201	89.48	
10	74.0	2.087	69.872	2.210	89.84	
11	73.8	2.092	69.683	2.216	90.08	
12	73.6	2.098	69.494	2.222	90.33	
13	73.4	2.104	69.305	2.228	90.57	
14	73.2	2.110	69.117	2.234	90.82	
15	73.0	2.115	68.928	2.240	91.07	
16	72.9	2.118	68.833	2.243	91.19	
17	72.8	2.121	68.739	2.246	91.32	
18	72.6	2.127	68.550	2.253	91.57	
19	72.5	2.130	68.456	2.256	91.70	
20	72.4	2.133	68.361	2.259	91.82	
21	72.3	2.136	68.267	2.262	91.95	
22	72.2	2.139	68.172	2.265	92.08	
23	72.1	2.142	68.078	2.268	92.21	
24	72.0	2.145	67.984	2.271	92.33	
25	71.9	2.148	67.889	2.275	92.46	
26	71.8	2.151	67.795	2.278	92.59	Va = 7.5%
27	71.7	2.154	67.700	2.281	92.72	
28	71.6	2.157	67.606	2.284	92.85	
29	71.6	2.157	67.606	2.284	92.85	
30	71.5	2.160	67.511	2.287	92.98	Va = 7%
31	71.4	2.163	67.417	2.291	93.11	
32	71.4	2.163	67.417	2.291	93.11	
33	71.3	2.166	67.323	2.294	93.24	
34	71.2	2.169	67.228	2.297	93.37	
35	71.2	2.169	67.228	2.297	93.37	



...CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica
corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros”
con gradación MDC-2 e IPL de 6.8...

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0 - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8						
GRADACIÓN MDC-2						
No DE GIROS	ALTURA (mm)	Gmb est.	ALTURA corr.(mm)	Gmb corr.(gr/cm ³)	% Gmm	
36	71.1	2.172	67.134	2.300	93.50	Va = 6.5%
37	71.1	2.172	67.134	2.300	93.50	
38	71.0	2.175	67.039	2.303	93.63	
39	71.0	2.175	67.039	2.303	93.63	
40	70.9	2.178	66.945	2.307	93.77	
41	70.9	2.178	66.945	2.307	93.77	
42	70.8	2.181	66.850	2.310	93.90	
43	70.8	2.181	66.850	2.310	93.90	
44	70.7	2.184	66.756	2.313	94.03	Va = 6%
45	70.7	2.184	66.756	2.313	94.03	
46	70.7	2.184	66.756	2.313	94.03	
47	70.6	2.187	66.662	2.316	94.17	
48	70.6	2.187	66.662	2.316	94.17	
49	70.5	2.190	66.567	2.320	94.30	
50	70.5	2.190	66.567	2.320	94.30	
51	70.5	2.190	66.567	2.320	94.30	
52	70.4	2.193	66.473	2.323	94.43	
53	70.4	2.193	66.473	2.323	94.43	
54	70.4	2.193	66.473	2.323	94.43	
55	70.3	2.197	66.378	2.326	94.57	Va = 5.5%
56	70.3	2.197	66.378	2.326	94.57	
57	70.3	2.197	66.378	2.326	94.57	
58	70.3	2.197	66.378	2.326	94.57	
59	70.2	2.200	66.284	2.330	94.70	
60	70.2	2.200	66.284	2.330	94.70	
61	70.2	2.200	66.284	2.330	94.70	
62	70.1	2.203	66.190	2.333	94.84	
63	70.1	2.203	66.190	2.333	94.84	
64	70.1	2.203	66.190	2.333	94.84	
65	70.1	2.203	66.190	2.333	94.84	
66	70.0	2.206	66.095	2.336	94.97	
67	70.0	2.206	66.095	2.336	94.97	
68	70.0	2.206	66.095	2.336	94.97	
69	70.0	2.206	66.095	2.336	94.97	Va = 5%
70	69.9	2.209	66.001	2.340	95.11	



...CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica
corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros”
con gradación MDC-2 e IPL de 6.8...

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0 - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8						
GRADACIÓN MDC-2						
No DE GIROS	ALTURA (mm)	Gmb est.	ALTURA corr.(mm)	Gmb corr.(gr/cm ³)	% Gmm	
71	69.9	2.209	66.001	2.340	95.11	
72	69.9	2.209	66.001	2.340	95.11	
73	69.9	2.209	66.001	2.340	95.11	
74	69.9	2.209	66.001	2.340	95.11	
75	69.8	2.212	65.906	2.343	95.24	
76	69.8	2.212	65.906	2.343	95.24	
77	69.8	2.212	65.906	2.343	95.24	
78	69.8	2.212	65.906	2.343	95.24	
79	69.8	2.212	65.906	2.343	95.24	
80	69.7	2.215	65.812	2.346	95.38	
81	69.7	2.215	65.812	2.346	95.38	
82	69.7	2.215	65.812	2.346	95.38	
83	69.7	2.215	65.812	2.346	95.38	
84	69.7	2.215	65.812	2.346	95.38	
85	69.6	2.219	65.717	2.350	95.52	
86	69.6	2.219	65.717	2.350	95.52	
87	69.6	2.219	65.717	2.350	95.52	
88	69.6	2.219	65.717	2.350	95.52	Va = 4.5%
89	69.6	2.219	65.717	2.350	95.52	
90	69.6	2.219	65.717	2.350	95.52	
91	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
92	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
93	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
94	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
95	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
96	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
97	69.5	2.222	65.623	2.353	95.66	
98	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
99	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
100	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
101	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
102	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
103	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
104	69.4	2.225	65.529	2.357	95.79	
105	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	



...CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica
corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros”
con gradación MDC-2 e IPL de 6.8...

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0 - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8						
GRADACIÓN MDC-2						
No DE GIROS	ALTURA (mm)	Gmb est.	ALTURA corr.(mm)	Gmb corr.(gr/cm ³)	% Gmm	
106	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	
107	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	Va = 4%
108	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	
109	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	
110	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	
111	69.3	2.228	65.434	2.360	95.93	
112	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
113	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
114	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
115	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
116	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
117	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
118	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
119	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
120	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
121	69.2	2.231	65.340	2.363	96.07	
122	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
123	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
124	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
125	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
126	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
127	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
128	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
129	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
130	69.1	2.235	65.245	2.367	96.21	
131	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
132	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
133	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
134	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
135	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
136	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
137	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
138	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
139	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
140	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	



...CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica
corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros”
con gradación MDC-2 e IPL de 6.8...

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0 - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8						
GRADACIÓN MDC-2						
No DE GIROS	ALTURA (mm)	Gmb est.	ALTURA corr.(mm)	Gmb corr.(gr/cm ³)	% Gmm	
141	69.0	2.238	65.151	2.370	96.35	
142	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
143	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
144	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
145	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
146	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
147	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
148	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	Va = 3.5%
149	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
150	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
151	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
152	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
153	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
154	68.9	2.241	65.056	2.374	96.49	
155	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
156	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
157	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
158	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
159	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
160	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
161	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
162	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
163	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
164	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
165	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
166	68.8	2.244	64.962	2.377	96.63	
167	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
168	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
169	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
170	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
171	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
172	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
173	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
174	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
175	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	



...CUADRO N° 13. Determinación del número de giros para una volumetría específica
corrigiendo los % de Gmm en una “briqueta de ajuste a giros”
con gradación MDC-2 e IPL de 6.8.

MEZCLA DE AJUSTE SEPTIEMBRE 10-2007. BRIQUETA 0 - 200 GIROS - CHUZADA. IPL=6.8						
GRADACIÓN MDC-2						
No DE GIROS	ALTURA (mm)	Gmb est.	ALTURA corr.(mm)	Gmb corr.(gr/cm ³)	% Gmm	
176	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
177	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
178	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
179	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
180	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
181	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
182	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
183	68.7	2.248	64.868	2.381	96.77	
184	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
185	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
186	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
187	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
188	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
189	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
190	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
191	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
192	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
193	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
194	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
195	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
196	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
197	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
198	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
199	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	
200	68.6	2.251	64.773	2.384	96.91	



14º. Acondicionamiento ambiental de las briquetas para simular las condiciones medias de trabajo.



IMAGEN N° 62. Grupo para el acondicionamiento ambiental de la mezcla MDC-2 con IPL de 7.7

Terminado el proceso de fabricación de especímenes, se procedió a formar grupos de mínimo 6 especímenes, ver cuadro N° 14 y anexo G, tratando primero de que en cada grupo la volumetría fuese lo más parecida posible y segundo que hubiesen parejas de porcentajes de vacíos similares. Estos grupos se constituyeron con el fin de dar cumplimiento a lo propuesto en el proyecto de investigación, en el cual se establece realizar un acondicionamiento ambiental a las temperaturas de 35, 45 y 55°C a los diferentes especímenes elaborados, lo que tiene como finalidad simular las condiciones medias de trabajo en Colombia a las que son sometidas las mezclas asfálticas en caliente.

La temperatura media anual que se presenta en Colombia es de 24°C, algunas ciudades como Santa Fe de Bogotá, San Juan de Pasto y Tunja entre otras presentan temperaturas medias inferiores a los 13°C, ciudades como Cali, Ibagué y Bucaramanga entre otras tienen temperaturas medias cercanas a los 24°C y ciudades como Montería, Valledupar y Cartagena entre otras presentan temperaturas medias próximas a los 30°C, como se puede ver imperan temperaturas entre los 13 y 30°C, sin descartar que en algunas épocas del año las



temperaturas en ciertas zonas como en la sabana de Bogotá y en altitudes superiores a los 2500 msnm las temperaturas pueden llegar menos 0°C y en la costa Atlántica y valles como el del Patía pueden superar los 36°C, esto sin considerar los actuales panoramas de clima a nivel mundial en donde se vienen presentando temperaturas extremas por efecto de la contaminación y que trae consigo lo que denominan los expertos, calentamiento global, en todo el planeta.

CUADRO N° 14. Grupos conformados para el acondicionamiento ambiental a las temperaturas de 35, 45 y 55°C, correspondientes a la gradación MDC-2 e IPL de 6.8.

IPL = 6,8		%Pb = 5,5				T (°C) = 35		Gmm = 2,460			
GRADACIÓN MDC-2											
% Va inicial	Briqueta #	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va final
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb	
3.5	10	6.29	6.29	6.29	6.28	6.29					
4.4	15	6.41	6.39	6.40	6.40	6.40					
4.4	72	6.47	6.48	6.47	6.47	6.47					
5.0	58	6.54	6.57	6.57	6.54	6.56					
5.5	56	6.54	6.55	6.56	6.56	6.55					
5.7	77	6.59	6.58	6.58	6.59	6.59					
6.1	67	6.58	6.60	6.59	6.58	6.59					
IPL = 6,8		%Pb = 5,5				T (°C) = 45		Gmm = 2,460			
GRADACIÓN MDC-2											
% Va inicial	Briqueta #	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va final
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb	
3.5	11	6.31	6.34	6.32	6.32	6.32					
4.4	18	6.36	6.39	6.37	6.37	6.37					
4.8	14	6.41	6.39	6.42	6.41	6.41					
5.2	17	6.40	6.40	6.42	6.43	6.41					
5.8	7	6.43	6.41	6.43	6.41	6.42					
6.3	60	6.55	6.52	6.52	6.51	6.53					
IPL = 6,8		%Pb = 5,5				T (°C) = 55		Gmm = 2,460			
GRADACIÓN MDC-2											
% Va inicial	Briqueta #	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va final
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb	
3.5	12	6.26	6.23	6.25	6.26	6.25					
4.4	19	6.37	6.39	6.38	6.40	6.39					
4.8	24	6.32	6.32	6.31	6.33	6.32					
5.2	16	6.41	6.39	6.39	6.40	6.40					
5.4	13	6.41	6.45	6.44	6.43	6.43					
6.4	62	6.50	6.49	6.50	6.50	6.50					
6.9	78	6.47	6.48	6.50	6.48	6.48					



Se consideran con base en lo citado anteriormente tres temperaturas del aire, correspondientes a 11, 22 y 32°C, las cuales son llevadas a temperatura de mezcla (temperatura que adquiere la capa de rodadura en condiciones de servicio) utilizando la fórmula para diseño de pavimentos de la SHRP, dichas temperaturas son entonces 35, 45 y 55°C, las cuales se emplearán en el acondicionamiento ambiental de los especímenes.

CUADRO N° 15. Temperaturas de mezcla en función de la temperatura del aire para una latitud de 12°26'46'' en diferentes ciudades Colombianas.

CIUDAD	TEMPERATURA MEDIA ANUAL PONDERADA DEL AIRE, °C	TEMPERATURA DEL PAVIMENTO (T20 mm), °C
Santa Fé de Bogotá	13	36.7
Medellin	23	46.3
Cali	24	47.2
Barranquilla	28	51.0
Cartagena	30	52.9
Leticia	26	49.1
Manizales	17	40.5
Popayán	19	42.4
Armenia	22	45.3

El procedimiento mediante el cual se acondicionó ambientalmente cada espécimen se resume a continuación: en primer lugar se estableció una manera en el laboratorio que permitiera garantizar la temperatura seleccionada (35, 45 y 55°C) en cada espécimen, esto se consiguió mediante el empleo de un horno ventilado y controlado termostáticamente, en el que se introdujeron 6 especímenes de “prueba” sobre una bandeja, en donde a cada espécimen se le perforó un agujero en el centro de la cara superior hasta una profundidad igual a la mitad de la altura del mismo, el cual seguidamente se lleno con aceite, para luego introducir en el, un termómetro. Este procedimiento permitió establecer el tiempo necesario para que cada espécimen del grupo alcance la temperatura de acondicionamiento ambiental, tiempo que fue de 2 horas. Una vez establecido este proceso se procedió a efectuar en segunda instancia el acondicionamiento para cada grupo de mínimo 6 especímenes por cada combinación de gradación, IPL y temperatura de acondicionamiento. Al mismo tiempo que se realizaba este



proceso se calentaba el molde de compactación en el mismo horno y por el mismo periodo de tiempo con el fin de garantizar la homogeneidad de la temperatura evitando así disminución de la misma en el momento de la compactación posterior.



**IMAGEN N° 63. Acondicionamiento ambiental
con especímenes de prueba.**

15º. Compactación adicional en condiciones de servicio.

El principal objetivo de esta investigación es evaluar la susceptibilidad de las diferentes mezclas a la compactación adicional condiciones de servicio por acción del tránsito pesado. Para realizar esta evaluación se han recorrido una serie de etapas hasta el momento que han permitido ir elaborando las diferentes mezclas asfálticas con los requisitos planteados en el proyecto de este estudio, sin embargo para culminar la etapa de experimentación en el laboratorio es necesario compactar cada uno de los especímenes que hacen parte de cada grupo, en las condiciones ambientales correspondientes. Esta compactación que será considerada adicional se llevó a cabo utilizando el SCG bajo los mismos parámetros de presión de compactación; ángulo de giro externo y número de revoluciones por minuto del plato, descritos en el numeral 12 del presente capítulo. El número de giros seleccionado es 205, el cual corresponde a los giros máximos establecidos en la tabla 1 de la norma AASHTO R 35-04, para tránsito alto, que se aplican en la etapa de compactación de la mezcla caliente para simular en el laboratorio la compactación que realizan equipos adecuados y eficientes utilizados en el proceso constructivos de capas asfálticas de carreteras importantes. Se



consideró que aplicar estos giros proporcionaría una compactación intensa que permitiría sensibilizar la susceptibilidad a la compactación adicional por tránsito en condiciones de servicio, de las diferentes mezclas estudiadas. Criterio que resulto efectivo dado que las mezclas presentaron para esta compactación modificaciones importantes en su volumetría.

Para resumir, la compactación adicional se efectuó así: una vez terminado el proceso de acondicionamiento ambiental se introdujo cada espécimen en el molde de compactación, lo que no representó mayor dificultad, y se procedió a aplicar la energía de compactación correspondiente a los giros máximos (205) en el SCG.



IMAGEN N° 64. Disposición del espécimen acondicionado en el molde de compactación

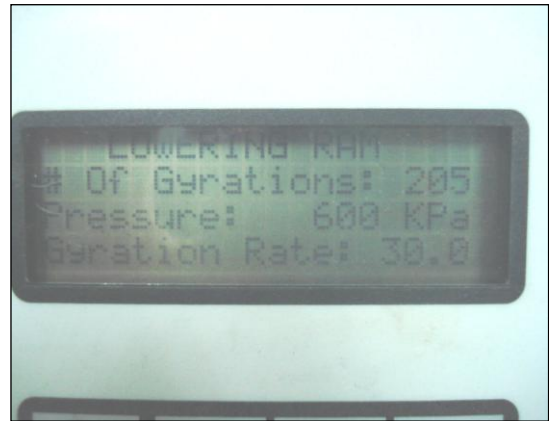


IMAGEN N° 65. Alimentación del software del SCG con los parametros de compactación



FIGURA N° 66. Compactación adicional de especímenes en condiciones de servicio.



16º. Evaluación de los especímenes en condiciones finales.

Cada probeta se evaluó de nuevo volumétricamente, mediante la medición del Gmb, para determinar el efecto de la compactación adicional en condiciones de servicio, ver cuadro N° 16 y anexo H.

El procedimiento para determinar el Gmb de cada espécimen compactado, se describe en la norma INV E 733-07 tal como se indico en el numeral 13 del presente capitulo, dicha medición se deberá llevar a cabo una vez el espécimen alcance la temperatura de servicio considerada.



IMAGEN N° 67. Determinación de la masa del espécimen en condición saturada y superficialmente seca, para la medición del Gmb de los especímenes compactados con energía adicional.

17º. Compilación, sistematización y análisis de la información obtenida en el laboratorio.

Toda la información recolectada en la etapa de experimentación en el laboratorio se analizó y los resultados se presentan en el capítulo 3.



CUADRO N° 16. Datos obtenidos en laboratorio para la determinación del Gmb y % de Va finales, luego de la compactación adicional, para los especímenes de la gradación MDC-2 con IPL de 6.8 y temperaturas de acondicionamiento de 35, 45 y 55°C.

IPL = 6,8		%Pb = 5,5				T (°C) = 35		Gmm = 2,460			
GRADACIÓN MDC-2											
% Va inicial	Briqueta #	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va final
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb	
3.5	10	6.29	6.29	6.29	6.28	6.29	1157.6	675.2	1158.2	2.397	2.6
4.4	15	6.41	6.39	6.40	6.40	6.40	1162.8	675.3	1164.0	2.379	3.3
4.4	72	6.47	6.48	6.47	6.47	6.47	1185.8	688.0	1186.5	2.379	3.3
5.0	58	6.54	6.57	6.57	6.54	6.56	1185.8	684.7	1187.0	2.361	4.0
5.5	56	6.54	6.55	6.56	6.56	6.55	1177.7	678.3	1179.3	2.351	4.4
5.7	77	6.59	6.58	6.58	6.59	6.59	1178.4	678.6	1180.5	2.348	4.6
6.1	67	6.58	6.60	6.59	6.58	6.59	1173.6	675.0	1175.8	2.343	4.7
IPL = 6,8		%Pb = 5,5				T (°C) = 45		Gmm = 2,460			
GRADACIÓN MDC-2											
% Va inicial	Briqueta #	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va final
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb	
3.5	11	6.31	6.34	6.32	6.32	6.32	1167.8	681.8	1168.8	2.398	2.5
4.4	18	6.36	6.39	6.37	6.37	6.37	1162.8	675.6	1163.7	2.382	3.2
4.8	14	6.41	6.39	6.42	6.41	6.41	1164.4	676.4	1166.6	2.375	3.4
5.2	17	6.40	6.40	6.42	6.43	6.41	1161.6	673.7	1163.5	2.372	3.6
5.8	7	6.43	6.41	6.43	6.41	6.42	1160.2	671.2	1162.1	2.363	3.9
6.3	60	6.55	6.52	6.52	6.51	6.53	1171.8	676.7	1173.3	2.360	4.1
IPL = 6,8		%Pb = 5,5				T (°C) = 55		Gmm = 2,460			
GRADACIÓN MDC-2											
% Va inicial	Briqueta #	Alturas (cm)				h _{prom.}	Densidad bulk (Gmb)				% Va final
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄		W _{aire} (g)	W _{agua} (g)	W _{sss} (g)	Gmb	
3.5	12	6.26	6.23	6.25	6.26	6.25	1162.6	681.4	1163.2	2.413	1.9
4.4	19	6.37	6.39	6.38	6.40	6.39	1174.1	684.5	1174.8	2.395	2.7
4.8	24	6.32	6.32	6.31	6.33	6.32	1164.1	677.6	1164.8	2.389	2.9
5.2	16	6.41	6.39	6.39	6.40	6.40	1163.4	675.4	1164.4	2.379	3.3
5.4	13	6.41	6.45	6.44	6.43	6.43	1170.1	680.4	1172.5	2.378	3.3
6.4	62	6.50	6.49	6.50	6.50	6.50	1179.8	682.9	1180.9	2.369	3.7
6.9	78	6.47	6.48	6.50	6.48	6.48	1175.3	680.3	1177.0	2.366	3.8



Capítulo 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de los resultados contempla tres temas a analizar, estos son:

3.2 *Comportamiento de la gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), de un material al variar la granulometría y la cantidad de asfalto.*

3.3 *Trabajabilidad de las mezclas en las condiciones de construcción.*

3.4 *Tendencia a la variabilidad volumétrica por acción del tránsito pesado en condiciones de operación.*

En este estudio se entiende por trabajabilidad de la mezcla, como la facilidad ó dificultad que presenta una mezcla a ser compactada en un determinado proceso de compactación, siendo en este caso el compactador giratorio bajo una presión de 600 kPa, un ángulo de giro de 1.25° y un número de giros comprendidos entre 0 y 205.

Para este análisis se utilizó la información de las múltiples briquetas (aproximadamente 315) que se tuvieron que fabricar para lograr los vacíos de aire iniciales fijados en la propuesta de este estudio. Como en algunos casos se tuvo que trabajar por medio de tanteos, no se cuenta con una serie de datos ordenados producto de seguir una metodología sistemática que permitiera contar con el mismo número de datos para cada variable, sin embargo, se organizó de forma tal que se pudiera analizar el efecto de la granulometría, la cantidad de ligante (IPL) y la viscosidad del mismo en la trabajabilidad de las diferentes mezclas.



Se muestran en este capítulo una serie de gráficas obtenidas como resultado de la sensibilización de las variables anteriormente mencionadas para cada una de las mezclas trabajadas.

3.2 COMPORTAMIENTO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO (Gse) DE UN MATERIAL AL VARIAR LA GRANULOMETRÍA Y LA CANTIDAD DE ASFALTO

CUADRO N° 17. Valores de Gse calculados para cada % de Pb

GRADACIÓN	ÍNDICE DE ESPESOR DE PELÍCULA (IPL)	CONTENIDO DE ASFALTO TOTAL (%Pb)	GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA (Gmm)	GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO (Gse)
MDC-2	6.8	5.50	2.460	2.684
	7.2	5.80	2.446	2.680
	7.7	6.10	2.433	2.677
SUPERPAVE	6.8	4.70	2.475	2.665
	7.2	4.90	2.467	2.665
	7.7	5.20	2.456	2.665
MSC-2	6.8	4.55	2.490	2.677
	7.2	4.78	2.482	2.677
	7.7	5.07	2.471	2.677
MSC-2-A	5.7	4.25	2.502	2.677
	6.0	4.50	2.491	2.675

Para cumplir con los objetivos de este estudio se requiere encontrar el valor del porcentaje de Gmm para cada uno de las mezclas contempladas, para ello se debe calcular el valor de Gse, el cual se determinó con base en datos obtenidos de laboratorio permitiendo concluir que este valor es invariante para cada gradación trabajada y no se ve afectado por el contenido de ligante, lo cual se da debido al acondicionamiento al que fueron sometidas las diferentes mezclas trabajadas en este estudio (cuatro horas en un horno de ventilación a una temperatura de 135°C), permitiendo



así inferir que el G_{se} es una propiedad de los agregados siempre y cuando se respete la viscosidad recomendada del ligante en el momento de la mezcla (1.70 Stokes) y se efectuó el acondicionamiento mencionado, ver cuadro N° 17.

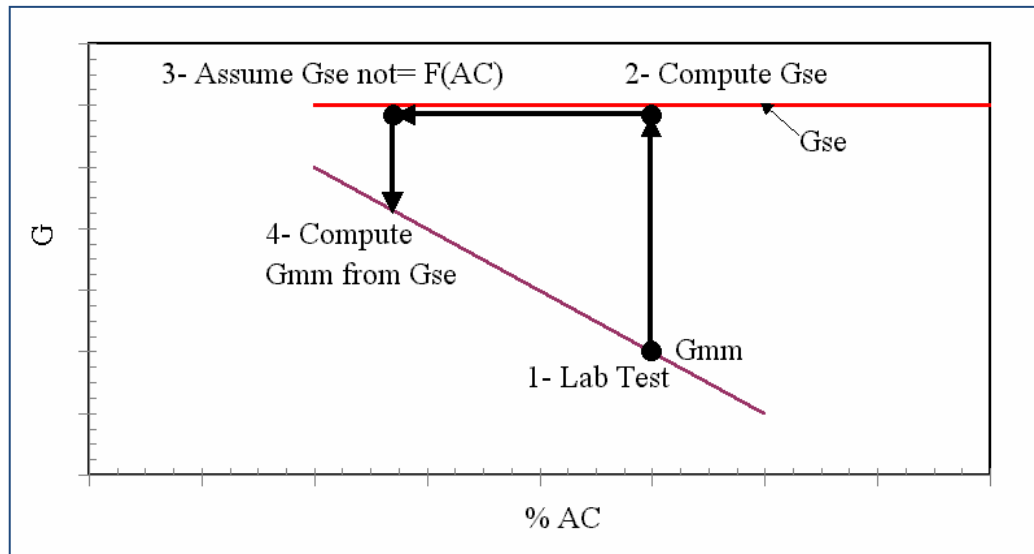


FIGURA N° 16. Effective Specific Gravity (G_{se})²⁴

Debido a lo anterior se tiene que para encontrar el porcentaje de G_{mm} de una mezcla con una gradación específica es necesario solo medir una densidad máxima teórica (G_{mm}) en el laboratorio, con el valor encontrado y con el porcentaje de ligante total (P_b) requerido para la nueva mezcla se puede calcular el valor de la densidad máxima teórica sin necesidad de ser medida en el laboratorio para todos los porcentajes de P_b , tal como lo demuestra la figura N° 16. Es de destacar que se cumple solo manteniendo constante la gradación y el origen del agregado sin importar el contenido de ligante.

²⁴ Witczak. M. W. Fundamentals of Asphalt Mix Design. XVI COLOMBIAN SYMPOSIUM ON ENGINEERING OF PAVEMENTS. September 2007. Manizales, Colombia.



3.3 TRABAJABILIDAD DE LAS MEZCLAS EN CONDICIONES DE CONSTRUCCIÓN

En el análisis de trabajabilidad se tienen como variables las siguientes:

- Granulometría de La mezcla.

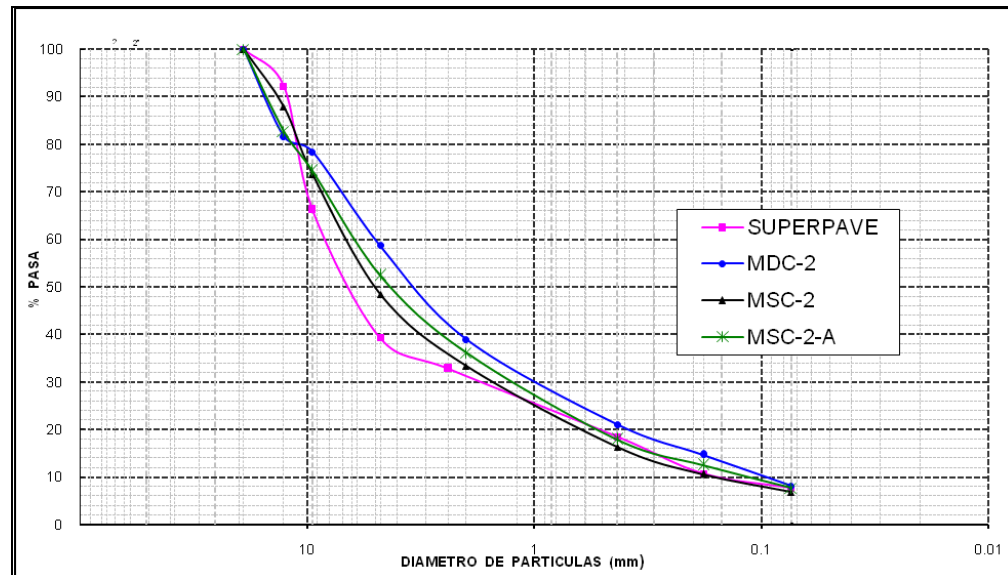


FIGURA N° 17. Gradaciones de trabajo

Se consideraron las siguientes mezclas asfálticas para el desarrollo del estudio, cada una de ellas elaboradas bajo los requisitos granulométricos exigidos en los estándares de las especificaciones:

- *MDC-2*: Mezclas elaboradas con gradación que cumple los requerimientos, para tamaño máximo de 3/4", dados en el artículo 450-07, del INVIAS.
- *SUPERPAVE*: Mezclas elaboradas con gradación que cumple los requerimientos, para tamaño máximo nominal de 1/2", dados en los estándares de la especificación AASHTO M 323-04.



- **MSC-2:** Mezclas elaboradas con gradación que cumple los requerimientos, para tamaño máximo de 3/4", dados en el artículo 450-07, del INVIAS.
- Cantidad de Ligante.

Expresada en este estudio como índice de espesor de película que cubre los agregados pétreos (IPL) de acuerdo al procedimiento indicado en la norma INV E-741-07.

CUADRO N° 18. Valores de IPL

GRADACIÓN	CONTENIDO DE ASFALTO TOTAL (%Pb)	ÍNDICE DE ESPESOR DE PELÍCULA QUE CUBRE LOS AGREGADOS (IPL)
MDC-2	5.50	6.8
SUPERPAVE	4.70	
MSC-2	4.55	
MDC-2	5.80	7.2
SUPERPAVE	4.90	
MSC-2	4.78	
MDC-2	6.10	7.7
SUPERPAVE	5.20	
MSC-2	5.07	
MSC-2-A	4.25	5.7
	4.5	6.0

- Temperatura de compactación o viscosidad del ligante.

Se manejaron las temperaturas de mezcla y compactación correspondientes a las viscosidades de 1.70 ± 20 Poises y 2.80 ± 30 Poises.



- Energía de compactación.

Se empleo la compactación giratoria Superpave con el compactador SGC, que posiciona el molde a un ángulo de 1.25°, el motor eléctrico acciona la base rotatoria a una velocidad constante de 30 rpm y somete el espécimen a una presión de compactación de 600 Kpa.

3.3.1 TRABAJABILIDAD DE LA GRADACIÓN MDC-2

En las figuras que se presentan a continuación se muestra el resultado de las mezclas fabricadas con una granulometría que cumple la especificación del INV para mezclas densas tipo MDC-2, con diferente IPL y compactados a una temperatura de 135°C.

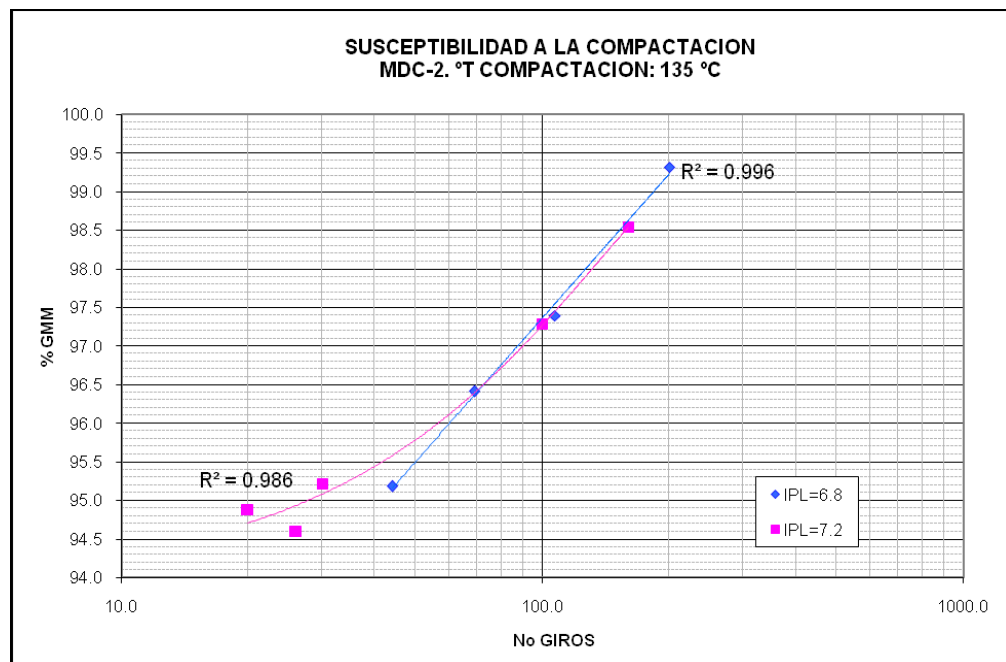


FIGURA N° 18. Trabajabilidad MDC-2 con IPL de 6.8 y 7.2

En la figura N° 18 se observa que para esta granulometría en general los vacíos de aire (V_a) alcanzados con energía de compactación pequeña, número de giros entre 0 y 70, están dentro de los valores exigidos en los estándares para el porcentaje de V_a , donde la especificación INV



artículo 450-07 para tránsito NT3 entre otros, establece que el Va debe estar entre 4 y 6%, situación que se hace más evidente para una cantidad de ligante que permite tener un IPL de 7.2, por ejemplo para lograr unos vacíos de aire en la mezcla de 4.8% se requieren de 30 giros para la mezcla con IPL 7.2 y 45 giros para la mezcla con IPL 6.8.

En general se presenta como una gradación extremadamente compactable, lo que sería ideal, si bajo la acción del tránsito, cuando este en operación la vía, la carpeta no evidenciará esta característica, que eventualmente podría hacerla susceptible a las deformaciones permanentes y por lo tanto al ahuellamiento. Más adelante con otros resultados se concluirá sobre este aspecto.

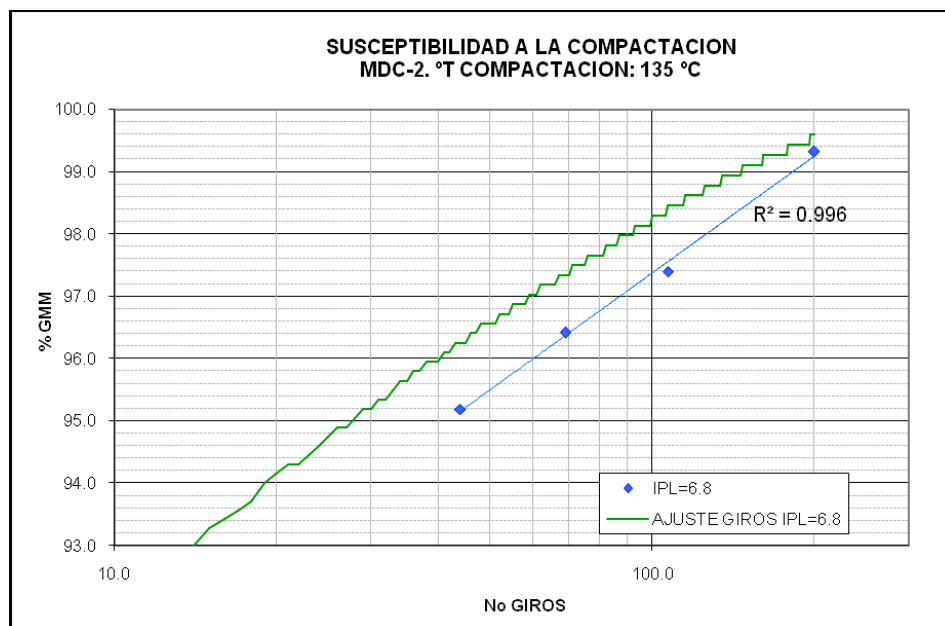


FIGURA N° 19. Trabajabilidad MDC-2 y ajuste de giros con IPL 6.8

Las figuras N° 19 y N° 20 permiten observar el grado de homogeneidad en mezclas MDC-2, en la respuesta a la compactación, cuando se aplica un procedimiento de compactación definido. El gráfico se realizó con los resultados de diferentes especímenes que tienen las mismas granulometrías, cantidad de ligante y temperatura de compactación. Donde la curva verde se ha elaborada con la información entregada por el SCG para una briqueta y representa la briqueta de ajuste de giros, número de giros versus porcentaje de gravedad específica máxima teórica (Gmm),



y las curvas azul (figura N° 19) y fucsia (figura N° 20) son obtenidas con información de varias briquetas que fueron compactadas bajo diferentes número de giros para los IPL de 6.8 y 7.2 respectivamente, estas últimas pueden ser consideradas como la representación del comportamiento general de la mezcla.

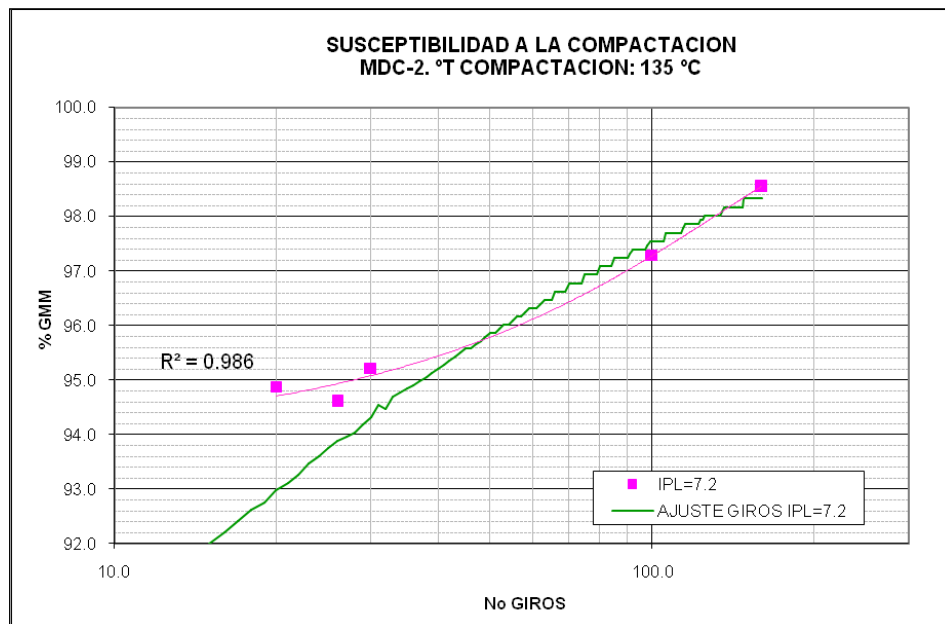


FIGURA N° 20. Trabajabilidad MDC-2 y ajuste de giros con IPL 7.2

Aunque la curva azul coincide en un punto no tiene la misma tendencia que la curva verde. Resulta muy difícil reproducir una condición volumétrica determinada a partir de la información obtenida en la briqueta de ajuste, a pesar de que en laboratorio se controlaron al máximo las variables que tradicionalmente se han considerado relevantes en las mezclas asfálticas como lo son: granulometría, cantidad de ligante, temperaturas de elaboración y de compactación de la mezcla, temperatura de calentamiento del molde, velocidad en las actividades y la colocación y caída de la mezcla dentro del molde de compactación. Sin embargo existen variables incontrolables como la heterogeneidad de la temperatura de la mezcla en el molde y la tendencia a la segregación de la misma. Que pensar en el campo donde las variables nunca llegan a tener el minucioso control de laboratorio. Esto es importante a tener en cuenta cuando se esté escogiendo el número de pruebas necesarias para llevar a cabo un control de compactación.



Algo similar sucede con la curva fucsia pero como se observa en la figura N° 20 con un menor grado de dispersión con respecto a la curva verde, pero con igual complejidad al momento de tratar de reproducir en el laboratorio una volumetría determinada con base en la lograda en la briqueta de ajuste.

Con base en lo anterior y considerando que las briquetas de ajuste fueron elaboradas bajo las mismas condiciones de gradación, temperatura y energía de compactación, teniendo como variable el IPL (6.8 y 7.2), se puede concluir que la respuesta a la compactación en estas mezclas (MDC-2), se ve afectada por variables incontrolables y que por lo tanto la curva de ajuste es única para cada briqueta resultando muy difícil su reproducción.

3.3.2 TRABAJABILIDAD DE LA GRADACIÓN SUPERPAVE

En las figuras que se presentan a continuación se muestra el resultado de las mezclas fabricadas con una granulometría que cumple la especificación de SUPERPAVE para mezclas asfálticas del mismo tipo, gradaciones que a propósito se alejan de la de máxima densidad, y por lo tanto se espera tengan un comportamiento diferente a la del tipo MDC-2.

En la figura N° 21 se presenta la respuesta a la compactación de las mezclas elaboradas con una granulometría SUPERPAVE y diferentes contenidos de ligante, se puede observar que el contenido de ligante tiene una influencia más apreciable en el cambio de las condiciones volumétricas durante la compactación que en la mezcla MDC-2, para obtener el porcentaje de V_a requerido, se demandará de mayor energía para un IPL bajo; esto se puede deber a que en mezclas con granulometría áspera como la SUPERPAVE el espesor de película tiene mayor incidencia en la manejabilidad, dado que la capa de ligante en los procesos de compactación, se constituye en el lubricante que facilita el movimiento de las partículas pétreas y por tanto el acomodo de las mismas, siempre y cuando no se incrementen a cantidades tales que llenen los vacíos entre partículas e impidan su aproximación.

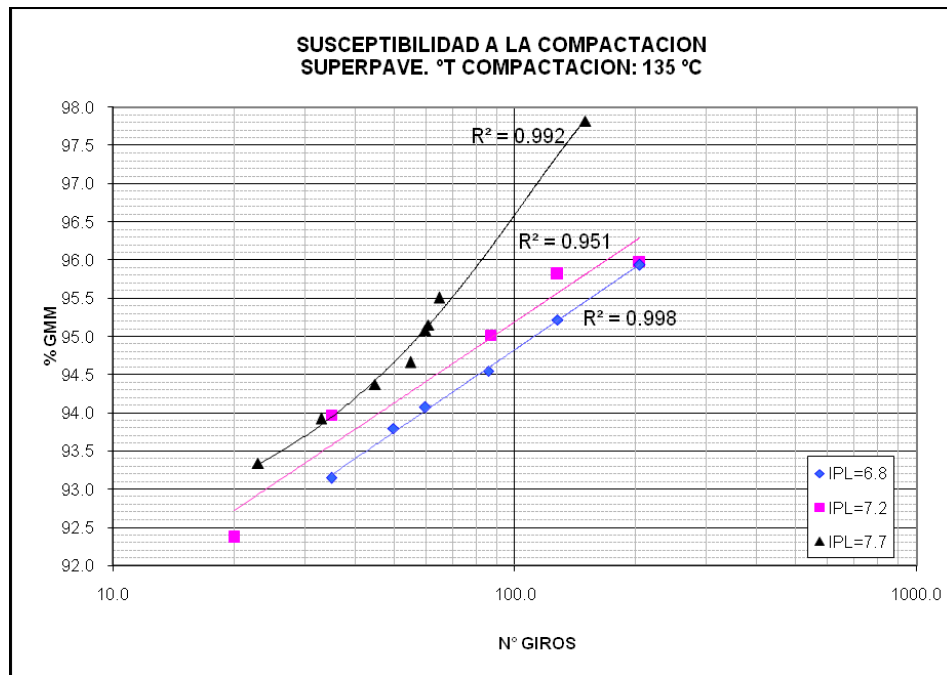


FIGURA N° 21. Trabajabilidad SUPERPAVE con IPL de 6.8, 7.2 y 7.7

Para llegar al nivel de los vacíos requeridos en las especificaciones INV y SUPERPAVE, estas mezclas demandan energías más altas, giros superiores a 60 en el caso del IPL de 7.7 y a 80 cuando el IPL es 6.8. Como ya se anotó, es evidente que la trabajabilidad de mezclas con este tipo de gradaciones es más sensible a la cantidad de ligante, con el IPL de 7.7 las mezclas notoriamente tienen mayor respuesta al proceso de compactación y presentan una drástica reducción de vacíos de aire a partir de 60 giros en comparación con las mezclas de IPL 6.8 y 7.2. Es importante tener en cuenta que algunas especificaciones como es el caso de establecidas por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, exigen que las mezclas tengan un IPL de 7.5.

Como se sabe, el contenido de ligante presente en una mezcla asfáltica afecta su trabajabilidad y el grado afectación depende de la gradación y angularidad del agregado pétreo y de los métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente, que pretenden definir una formula de trabajo donde el contenido óptimo de ligante proporcione a la mezcla la “trabajabilidad justa” en el momento de la compactación en obra, con el fin de lograr las condiciones volumétricas exigidas en la especificación pero sin que la mezcla resultante presente tendencia a la deformabilidad.



Las figuras N° 22, N° 23 y N° 24 permiten analizar la homogeneidad de la respuesta de mezclas SUPERPAVE cuando se aplica un procedimiento de compactación definido a diferentes briquetas que tienen la misma granulometría, cantidad de ligante y temperatura de compactación.

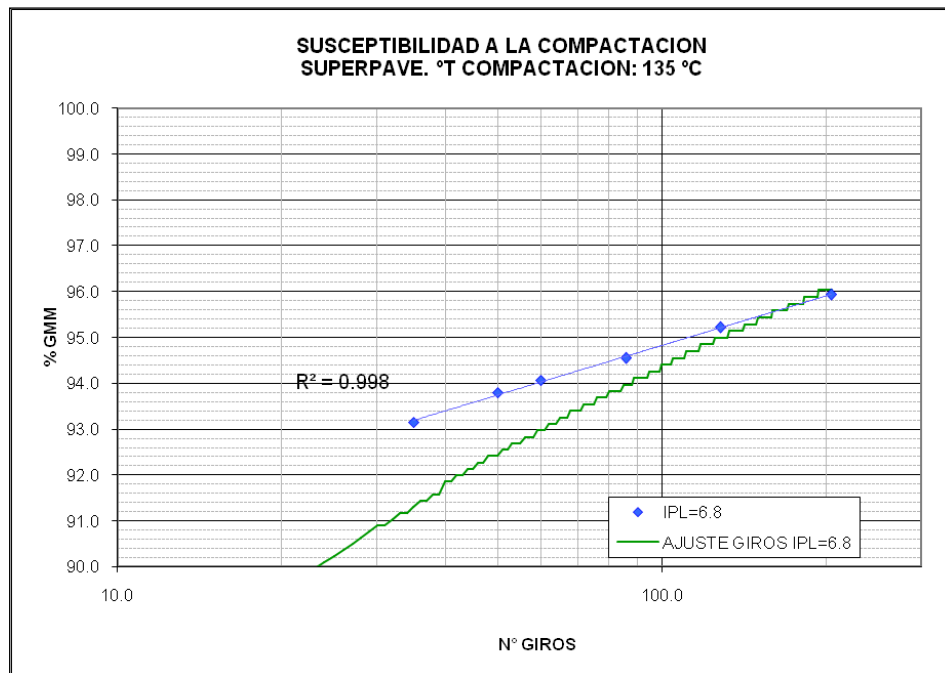


FIGURA N° 22. Trabajabilidad SUPERPAVE y ajuste de giros con IPL 6.8

En estas figuras se aprecia que en las mezclas con granulometría SUPERPAVE el comportamiento evaluado con la información que proporciona el equipo giratorio para una briketa, difiere al comportamiento deducido con varios especímenes compactados con diferentes giros, se puede explicar que en el proceso de compactación intervienen múltiples variables algunas de difícil control. Sin embargo, en el momento de reproducir una compactación para alcanzar un determinado porcentaje de Gmm, teniendo como base la información de la briketa de ajuste, la experimentación demostró que mezclas con la gradación SUPERPAVE tienen una buena reproducibilidad de la volumetría con los giros indicados en la de ajuste, cualidad que favorecerá el comportamiento durante la compactación en obra, serán mezclas que aunque presenten mayor dificultad en la compactación tendrán una respuesta más predecible que permitirán contar con capas de mayor grado de homogeneidad que en mezclas MDC-2.

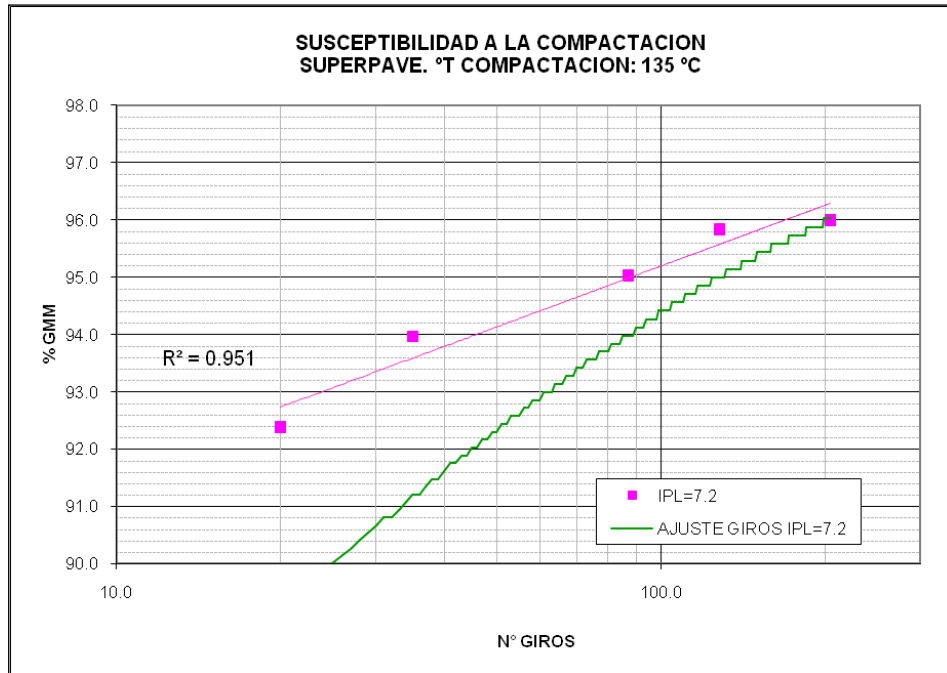


FIGURA N° 23. Trabajabilidad SUPERPAVE y ajuste de giros con IPL 7.2

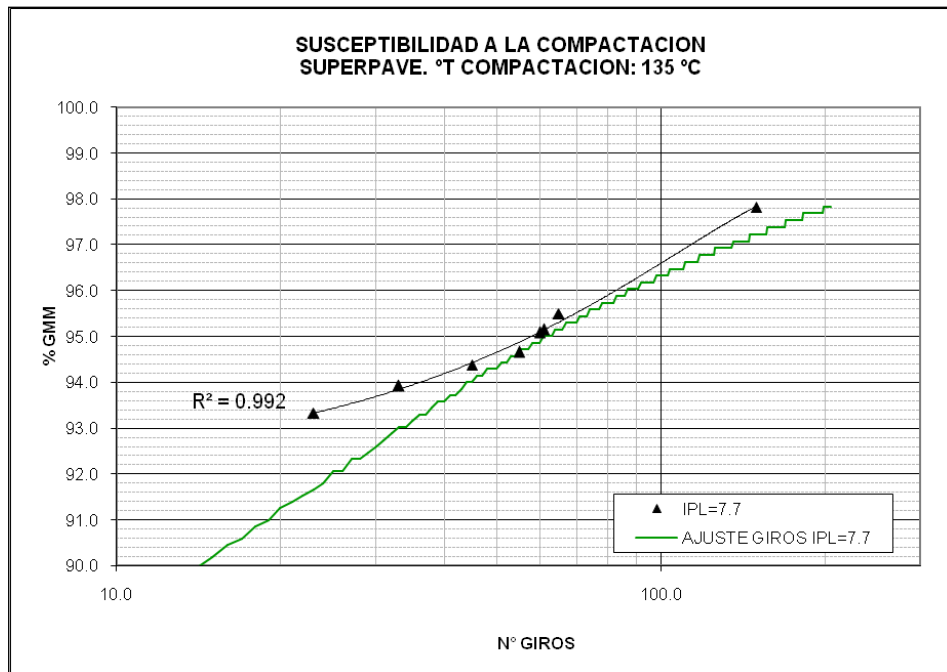


FIGURA N° 24. Trabajabilidad SUPERPAVE y ajuste de giros con IPL 7.7



Se debe destacar que en las mezclas con la cantidad de ligante que corresponde a un IPL de 7.7 se tiene un comportamiento notoriamente más homogéneo o más predecible, se puede, entonces, concluir que al aumentar el IPL se mejora la trabajabilidad, el grado de homogeneidad de la respuesta a un determinado proceso de compactación.

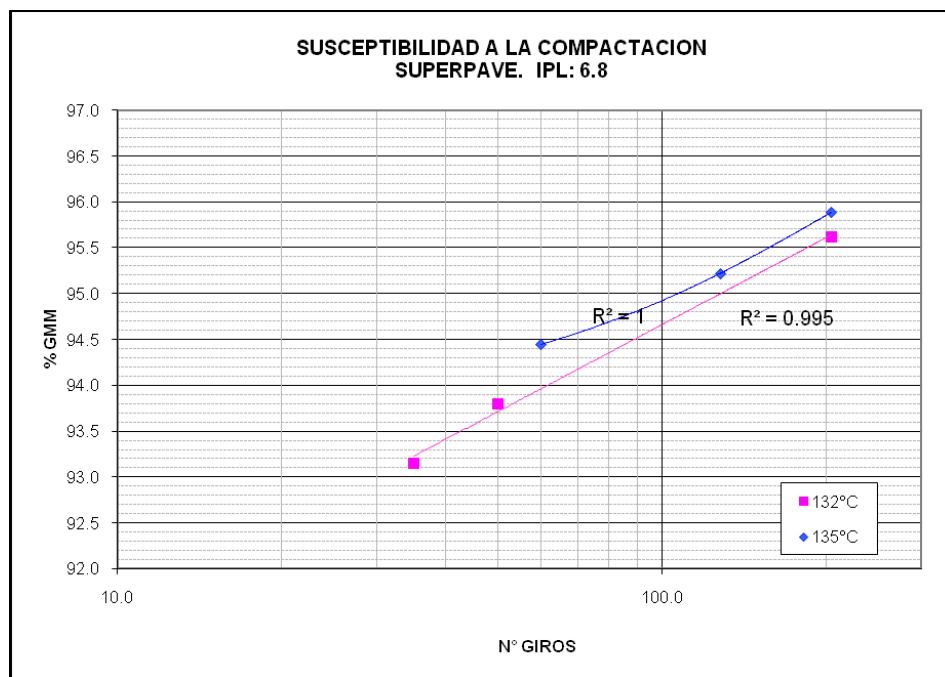


FIGURA N° 25. Trabajabilidad SUPERPAVE con dos temperaturas 132 y 135°C

En la figura N° 25 se muestra la tendencia de la respuesta de este tipo de mezclas a la compactación cuando se aplica un procedimiento de compactación definido a dos temperaturas diferentes. Las curvas son obtenidas con mezclas elaboradas con la misma granulometría y cantidad de ligante (IPL de 6.8). Es pertinente aclarar que en este estudio no se contempló inicialmente la temperatura de compactación como variable, pero al contar con datos obtenidos en los diversos tanteos que se debieron hacer para lograr las condiciones volumétricas iniciales requeridas, se procedió a elaborar las curvas a las que se está haciendo referencia. El gráfico permite evaluar el grado de incidencia que tienen pequeños cambios en la viscosidad del ligante en la respuesta a la compactación, leves cambios de temperatura en la mezcla asfáltica bajo unas mismas condiciones de gradación e IPL generan variaciones significativas en el porcentaje de



Gmm, lo que permite concluir que la mezcla con gradación SUPERPAVE, es además, altamente sensible a la viscosidad del asfalto en el momento de la compactación.

Con las demás gradaciones no se pudo realizar este análisis debido a la falta de datos, ya que como se mencionó anteriormente este análisis no está dentro del objetivo de la investigación.

3.3.3 TRABAJABILIDAD DE LA GRADACIÓN MSC-2

En las figuras que se presentan a continuación se muestra el resultado de las mezclas fabricadas con una granulometría que cumple la especificación del INV para mezclas semi-densas tipo MSC-2, mezclas que aunque hace algunos años estaban disponibles en la tecnología de pavimentos, no habían sido incorporadas a las especificaciones de construcción de carreteras. En los dos últimos años fueron incluidas en las especificaciones del INV y del IDU.

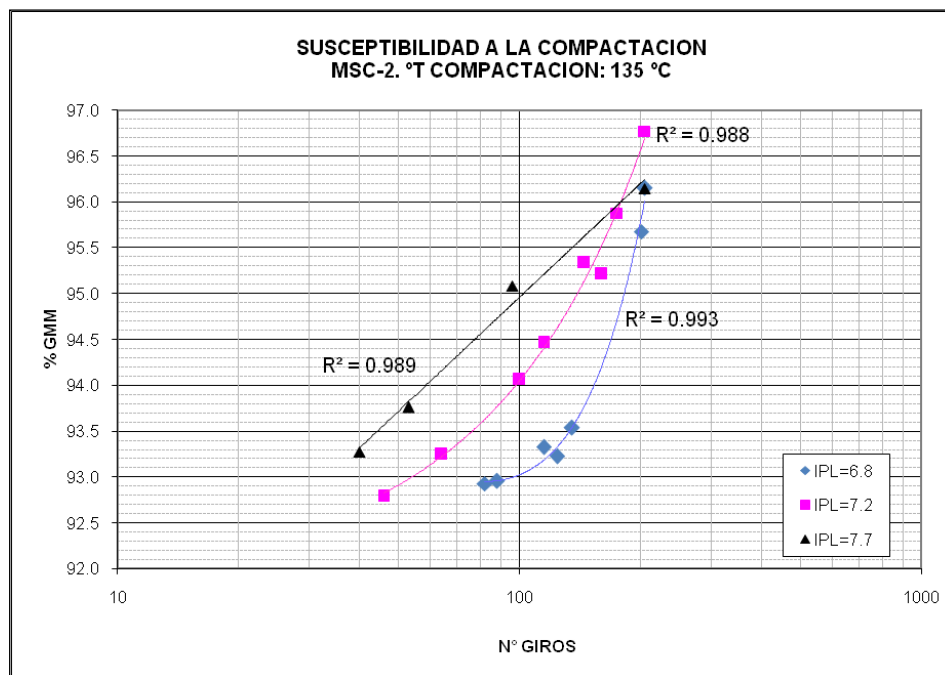


FIGURA N° 26. Trabajabilidad MSC-2 con IPL de 6.8, 7.2 y 7.7

La figura N° 26 presenta el comportamiento de mezclas elaboradas con una granulometría semi-densa, semejante a mezclas con gradación Superpave, donde se requiere aplicar energías



importantes para llegar a las condiciones volumétricas deseadas. Se muestra igualmente que para las tres cantidades de ligante manejadas se logran unos vacíos de aire adecuados con más de 100 giros y en general al incrementar estos, las mezclas son altamente sensibles, característica que en las mezclas Superpave únicamente se evidenciaba con IPL de 7.7.

También se puede afirmar que la trabajabilidad es sensible a la cantidad de ligante y mejora en las mezclas con valores de IPL de 7.7 debido a que esta requiere de menor energía de compactación para obtener un porcentaje dado de vacíos de aire; por ejemplo, para lograr un porcentaje de Gmm de 93.5 ($V_a=6.5\%$) se requiere aplicar 40 giros a la mezcla con IPL de 7.7, 65 giros a la mezcla con IPL de 7.2 y 120 giros a la mezcla con IPL de 6.8.

Para una energía de compactación correspondiente a los giros máximos (205) establecidos en los estándares para tránsito pesado de la especificación Superpave, se visualiza que la energía es independiente del IPL, ya que las tres gráficas buscan converger aproximadamente en dichos giros.

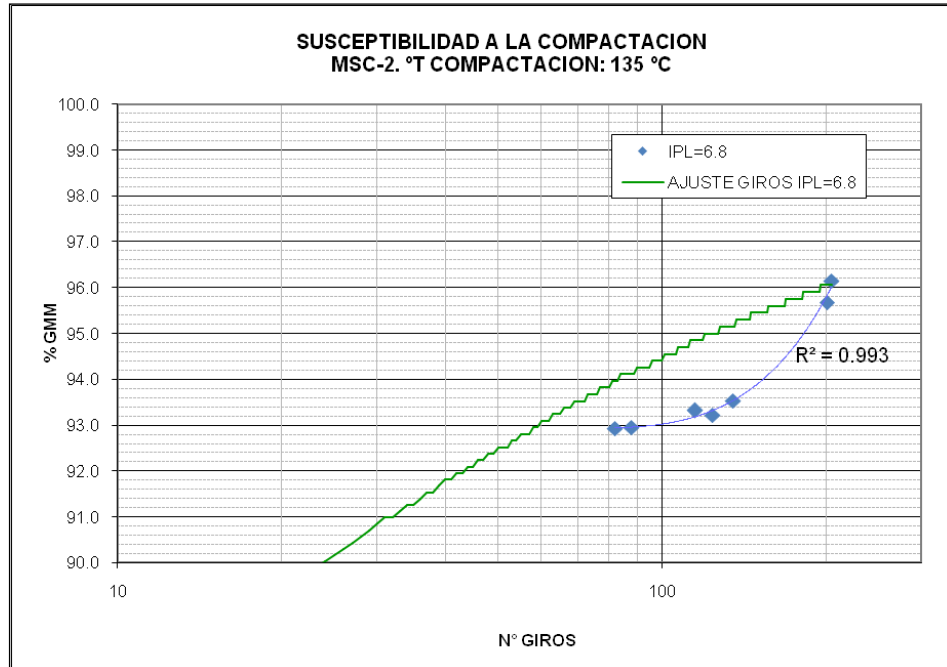


FIGURA N° 27. Trabajabilidad MSC-2 y ajuste de giros con IPL 6.8



Las figuras N° 27, N° 28 y N° 29 permiten analizar la homogeneidad de la respuesta de mezclas MSC-2 cuando se aplica un procedimiento de compactación definido a diferentes briquetas que tienen la misma granulometría, cantidad de ligante y temperatura de compactación.

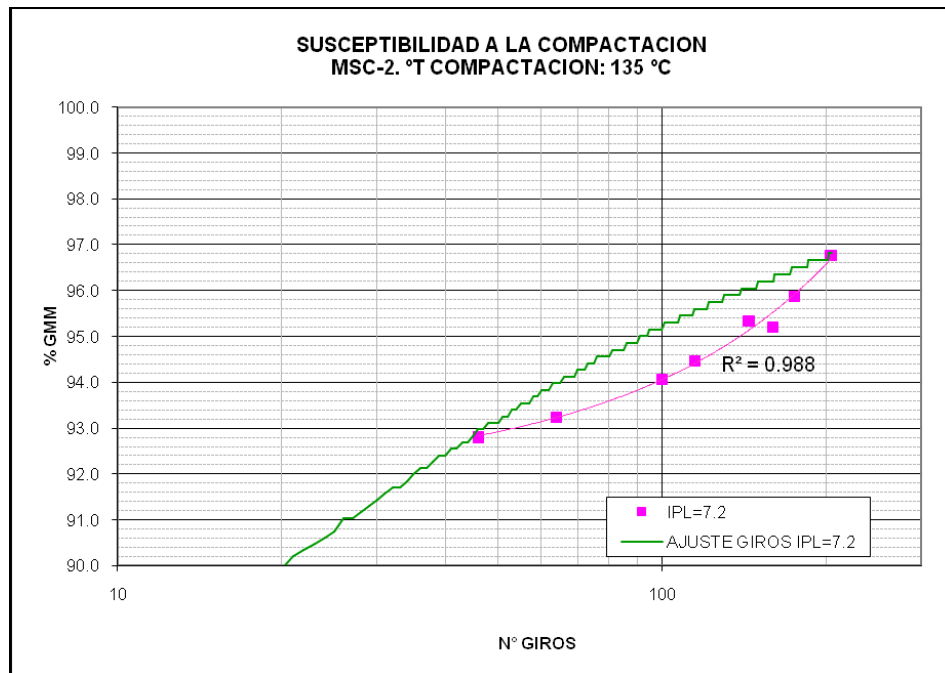


FIGURA N° 28. Trabajabilidad MSC-2 y ajuste de giros con IPL 7.2

En estas mezclas se observa un comportamiento semejante al analizado para las Superpave, notándose que con IPL de 7.7 se tienen mezclas cuya respuesta a la compactación es más predecible y la curva elaborada con diferentes especímenes para este IPL se asemeja a la curva proporcionada (ajuste de giros) por el equipo durante la compactación de un solo espécimen.

Se puede visualizar que la curva elaborada con la información de las briquetas para distintas características volumétricas es diferente a la briketa elaborada para el ajuste de número de giros para los IPL de 6.8 y 7.2, comprobándose nuevamente que las variables de difícil control, como la heterogeneidad de la temperatura de la mezcla en el molde y la tendencia a la segregación de la misma, juegan un papel muy importante al predecir con base en la curva de ajuste de giros la energía requerida para obtener un contenido de vacíos de aire específico en la mezcla.

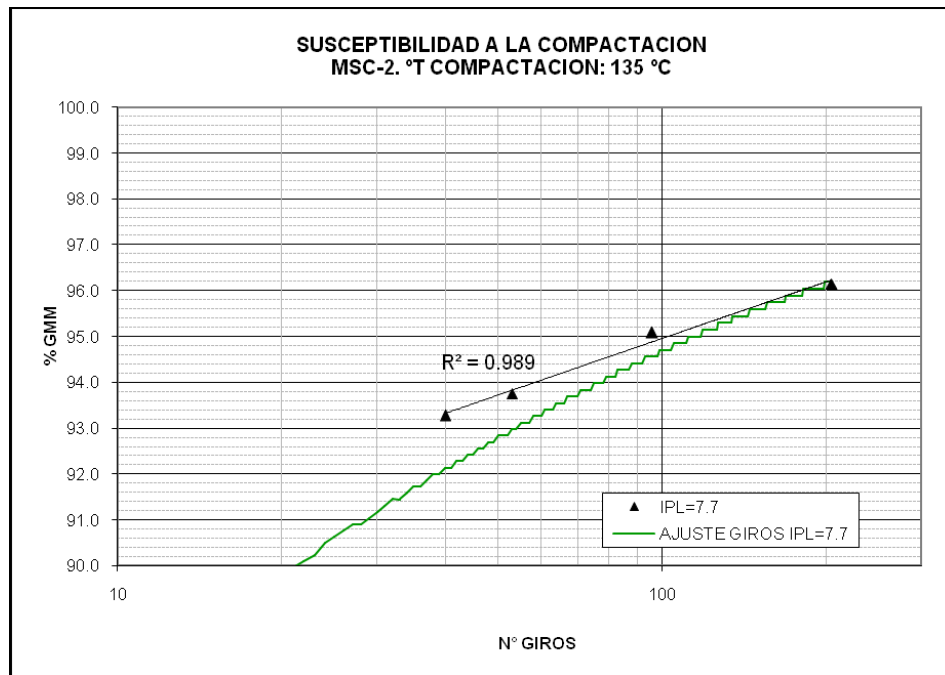


FIGURA N° 29. Trabajabilidad MSC-2 y ajuste de giros con IPL 7.7

3.3.4 TRABAJABILIDAD INTEGRAL DE LAS GRADACIONES MDC-2, SUPERPAVE Y MSC-2

Las figuras que se presentan a continuación, muestran cómo responden a la compactación giratoria mezclas elaboradas con las tres granulometrías contempladas en la investigación e igual IPL.

En la figura N° 30 se observa que las mezclas con la gradación densa tienen una excelente respuesta a la compactación, mientras las otras dos gradaciones requieren de una cantidad importante de giros para llegar a las condiciones volumétricas que con menos de 100 giros alcanzan las mezclas MDC-2, por ejemplo nótese, que para 100 giros dados en el SCG se tiene un porcentaje de Gmm igual a 93 para la gradación MSC-2 correspondiente a unos vacíos de aire en la mezcla del 7%; un porcentaje de Gmm igual a 94.8 para la gradación Superpave correspondiente a unos vacíos de aire en la mezcla del 5.2 %; y un porcentaje de Gmm igual a 97.3 para la gradación MDC-2, correspondiente a unos vacíos de aire en la mezcla del 2.75%.

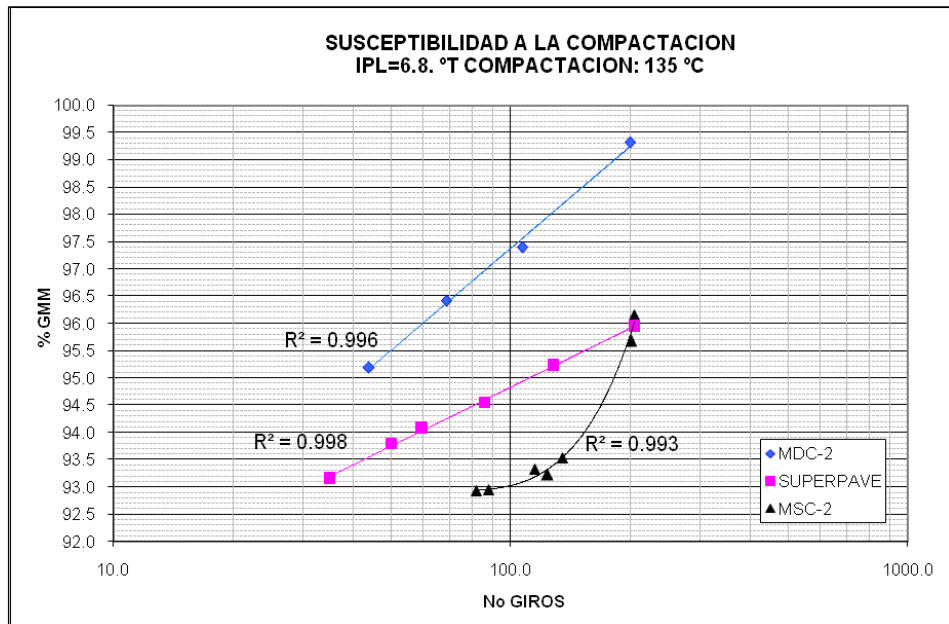


FIGURA N° 30. Trabajabilidad MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2 con IPL 6.8

Las mezclas MSC-2 y las SUPERPAVE tienen una reducción de vacíos de aire similar cuando se aplican los giros máximos, (205 - requerimiento de giros dados en el método Superpave para tránsito pesado), tal como se muestra en la figura N° 14, en donde se logra un 4% de vacíos de aire en las mezclas MSC-2 y SUPERPAVE, mientras que en las MDC-2 se alcanza una reducción severa en los vacíos del 0.7%.

Es importante anotar que la mezcla MSC-2 con una cantidad de ligante bajo presenta una respuesta deficiente a la compactación, dado que solo experimenta cambios volumétricos significados con giros mayores a 200.

En la figura N° 31 se muestra que las tres gradaciones de trabajo presentan un comportamiento distinto para un mismo índice de película (IPL=7.2), a pesar de contar con un espesor de capa lubricante semejante, lo que indica que la gradación es una variable más influyente en la trabajabilidad que alcanza la mezcla, sobre todo cuando se estén aplicando energías de compactación bajas.

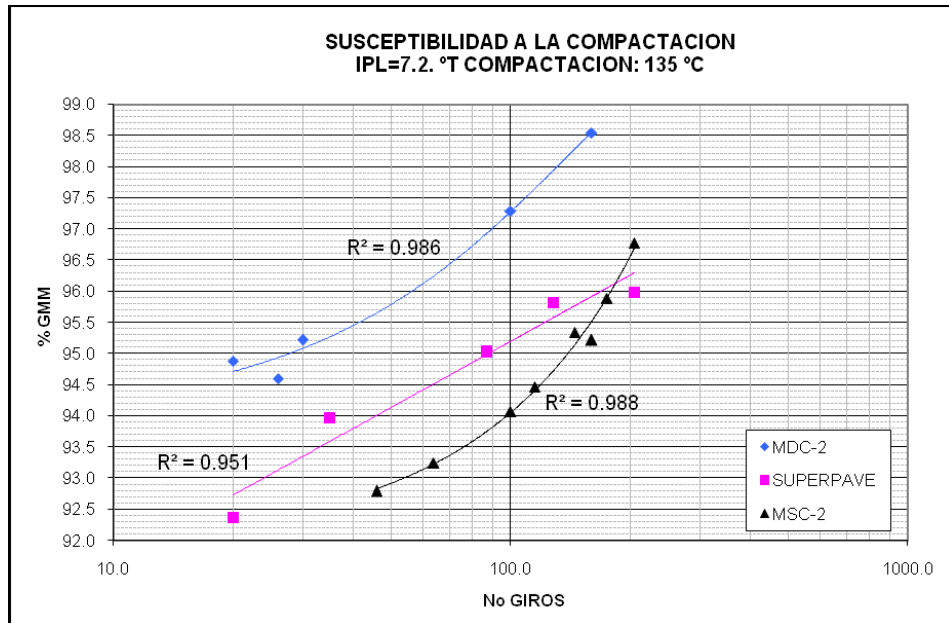


FIGURA N° 31. Trabajabilidad MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2 con IPL 7.2

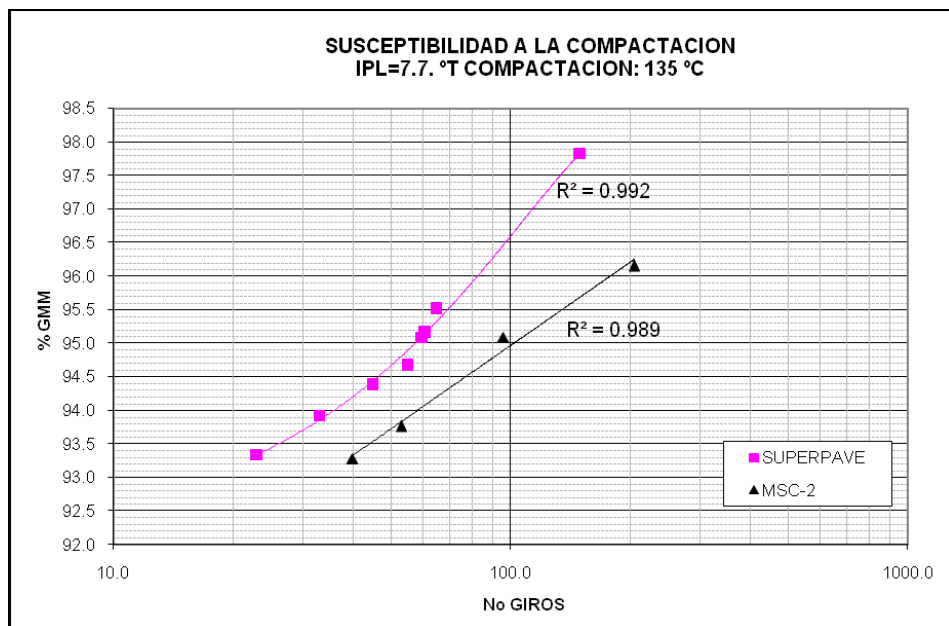


FIGURA N° 32. Trabajabilidad MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2 con IPL 7.7



Al incrementar el IPL (de 6.8 a 7.7) se observa, tal como lo muestran las figuras N° 30, N° 31 y N°32, que el comportamiento de las mezclas con las diferentes gradaciones en estudio tienen la misma tendencia. Para la gradación de las mezclas MDC-2 se aprecia que el incremento en el IPL no produce cambios en el porcentaje de Gmm, mientras que en las gradaciones de las mezclas SUPERPAVE y MSC-2, se presentan cambios significativos en este parámetro. Al incrementar el IPL, las mezclas presentan mejor respuesta a la compactación, lo que permite afirmar que se vuelven más trabajables. Si se compara la trabajabilidad de las mezclas MSC-2 y las SUPERPAVE, tal como se observa en el cuadro N° 19, es mayor en la gradación para las MSC-2 para incrementos de IPL comprendidos entre 6.8 y 7.2 y es superior en la gradación para las mezclas SUPERPAVE con incrementos de IPL de 6.8 a 7.7; lo que reitera nuevamente que la gradación SUPERPAVE responde de una manera efectiva cuando se lubrican más sus partículas y se aumenta la energía de compactación.

CUADRO N° 19. Variación del porcentaje de Gmm

GRADACIÓN	ENERGIA DE COMPACTACIÓN (80 GIROS)			ENERGIA DE COMPACTACIÓN (100 GIROS)			ENERGIA DE COMPACTACIÓN (150 GIROS)		
	IPL = 6.8	IPL = 7.2	IPL = 7.7	IPL = 6.8	IPL = 7.2	IPL = 7.7	IPL = 6.8	IPL = 7.2	IPL = 7.7
MDC-2	96.8	96.7	* * *	97.3	97.3	* * *	98.8	98.5	* * *
SUPERPAVE	94.5	95.0	95.9	94.8	95.4	96.6	95.7	95.9	97.8
MSC-2	92.9	93.6	94.5	93.0	94.1	94.9	94.5	95.5	95.7

En términos generales se concluye que al aumentar el IPL se produce una mejora de la trabajabilidad en las mezclas con gradaciones SUPERPAVE y MSC-2, mientras que las de gradación densa (MDC-2) prácticamente conservan la respuesta al proceso de compactación, quedando claro que estas hacen las mezclas muy trabajables y prácticamente poco sensibles a la cantidad de ligante. Las mezclas con gradación MSC-2 son las más sensibles a la variación del contenido de asfalto, debido a que su comportamiento fue el más favorecido por incrementos en el IPL.

Para terminar el análisis de la trabajabilidad de las mezclas estudiadas, se calculó el declive de compactación (ver anexo I), índice que algunos investigadores utilizan para evaluar la resistencia



que ofrece una mezcla a la compactación y la tendencia que presentarán al ahuellamiento. La forma más sencilla de interpretar este índice se puede resumir así: a medida que aumente el declive se tiene una mezcla con menor trabajabilidad y a su vez con menor susceptibilidad al ahuellamiento.

CUADRO N° 20. Valores de declive de compactación

GRADACIÓN \ LIGANTE	IPL = 6.8	IPL = 7.2	IPL = 7.7
MDC-2	6.1	7.0	***
SUPERPAVE	7.1	7.5	7.5
MSC-2	7.2	7.6	6.9

Al analizar los datos del declive se tiene en general, que las cualidades de la mezcla que permite inferir este índice concuerdan con las conclusiones que se han evidenciado en esta parte del estudio. Las mezclas MDC-2 son notoriamente más trabajables, pero el índice no resulta sensible como indicativo de la incidencia de la cantidad de ligante en la trabajabilidad de las mezclas ásperas, MSC-2 y SUPERPAVE, como se encontró en esta investigación.

3.4. TENDENCIA A LA VARIABILIDAD VOLUMÉTRICA POR ACCIÓN DEL TRÁNSITO PESADO EN CONDICIONES DE OPERACIÓN

Esta parte de la investigación como se ya se explicó, consiste en evaluar la tendencia al cambio volumétrico que tienen las mezclas asfálticas elaboradas en el laboratorio y compactadas inicialmente en el SCG hasta diferentes condiciones volumétricas, a las que se hará referencia como porcentaje de Va inicial o porcentaje de Gmm inicial. Para la evaluación de la susceptibilidad de las mezclas a la compactación adicional por efectos del tránsito pesado, los diferentes especímenes fabricados, se sometieron inicialmente a un acondicionamiento en el horno para colocarlos a temperatura de servicio y una vez alcanzada la condición se servicio a una



compactación adicional en el SCG, aplicando 205 giros a todos los especímenes. Posteriormente se les volvió a evaluar la volumetría determinándose el porcentaje de Va ó de Gmm final.

Las temperaturas de trabajo consideradas se definieron con anterioridad, basados en las condiciones ambientales promedio que se presentan en distintas regiones de Colombia, fría, templada y cálida.

Teniendo en cuentas que las variables consideradas en la investigación son: granulometría, cantidad de ligante (IPL), vacíos de aire (Va) iniciales y temperatura de la mezcla en condiciones de operación, el análisis se hará con cada variable y se iniciará con la incidencia en la respuesta a la compactación adicional en servicio, de las mezclas con la misma granulometría pero variando el IPL, Va inicial y la temperatura de servicio.

3.4.1. ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LA GRADACIÓN EN LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS A LA COMPACTACIÓN ADICIONAL EN CONDICIONES DE SERVICIO

El estudio plantea dentro sus objetivos el análisis de susceptibilidad a la compactación adicional en condiciones de servicio de mezclas elaboradas con tres gradaciones diferentes, densa, superpave y semi-densa.

Las gráficas que se muestran a continuación muestran la respuesta a la compactación adicional para las diferentes mezclas elaboradas, en las que se reprodujeron las condiciones ambientales previamente planteadas. Para facilitar el análisis e interpretación de los resultados obtenidos se elaboró en los gráficos una línea con pendiente de 45°, la cual representa una mezcla asfáltica ideal, en donde sus condiciones volumétricas iniciales no se ven afectadas por compactación adicional por efecto del tránsito, siendo por lo tanto para cada caso el referente para el análisis ya que es la mezcla “no susceptible al ahuellamiento”.



3.4.1.1. GRADACIÓN PARA MDC-2

Las gráficas N° 33, N° 34 y N° 35 muestran la respuesta, de las diferentes mezclas elaboradas con granulometría para MDC-2, a la compactación adicional bajo las diferentes temperaturas de servicio manejadas en el estudio.

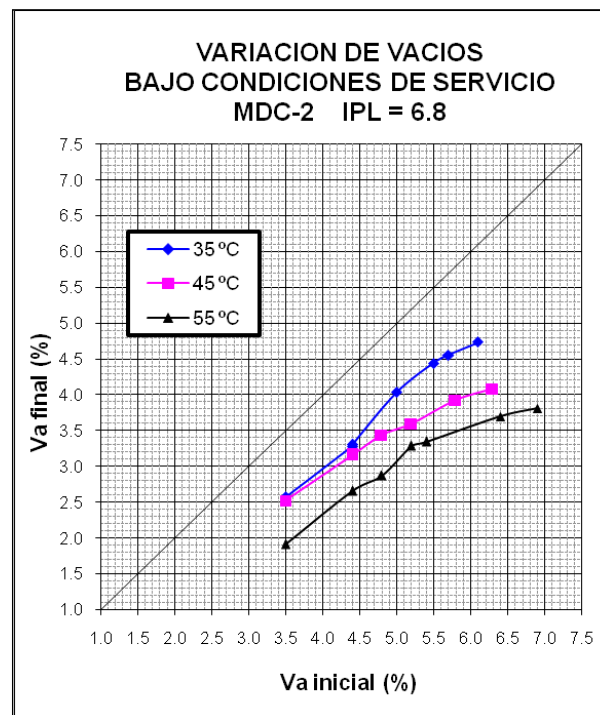


FIGURA N° 33. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MDC-2 con IPL de 6.8

Se debe tener en cuenta que las mezclas MDC-2, fueron las que presentaron mejor trabajabilidad en la etapa de fabricación y además en las que se encontró que durante la compactación inicial la respuesta de las mezclas no está afectada de forma considerable por la cantidad de ligante.

Al analizar las tres gráficas anteriores se encuentra que estas mezclas siguen en general teniendo una gran tendencia al cambio volumétrico, se observan importantes modificaciones en el porcentaje de Va en la compactación adicional, bajo las condiciones ambientales de servicio simuladas en esta investigación. La susceptibilidad es más evidente con la temperatura de trabajo más elevada, 55°C. También se evidencia que la susceptibilidad al cambio volumétrico en



condiciones de servicio si es sensible a la cantidad de ligante, entre más ligante la mezcla tiende más al cambio volumétrico durante la operación y por lo tanto es más propensa al ahuellamiento.

Para la gradación MDC-2, IPL 7.7 y temperatura de servicio de 55°C, se puede observar que los vacíos de aire finales en las mezclas, obtenidos después de la compactación adicional en condiciones de servicio, bajo una energía de 205 giros en el SCG, es menos sensible a las condiciones volumétricas iniciales de los especímenes.

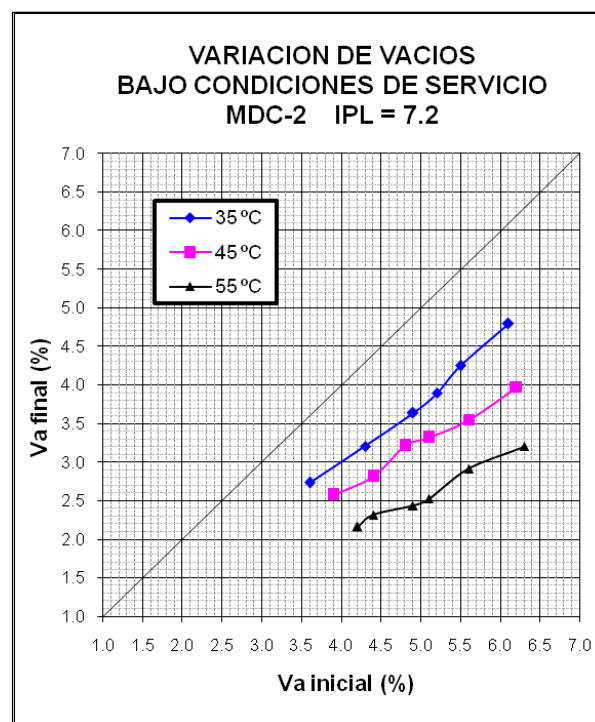


FIGURA N° 34. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MDC-2 con IPL de 7.2

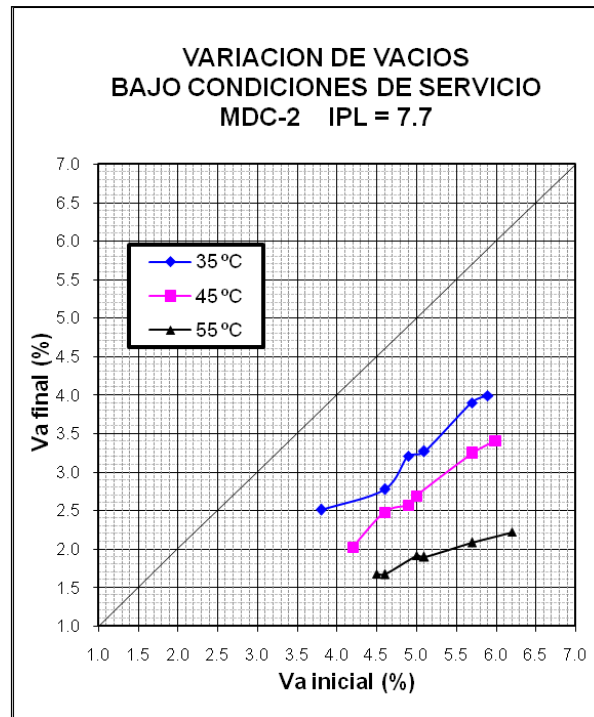


FIGURA N° 35. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MDC-2 con IPL de 7.7

Se observa en términos generales que a mayores temperaturas de servicio y contenidos de ligante, representado por incrementos en el IPL, se tiene una mayor reducción de porcentaje de vacíos de aire en la mezcla por compactación adicional, tal como lo ilustran los cuadros N° 21, N° 22 y N° 23. Se seleccionaron los porcentajes de Va iniciales que permiten las especificaciones del INV para mezclas de tránsito alto, (Va entre 4 y 6%).

CUADRO N° 21. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 4% por efecto de la compactación adicional en mezclas MDC-2

	GRADACIÓN MDC-2 % Va (iniciales) = 4.0								
	IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	3.0	2.9	2.3	3.0	2.6	2.0	2.6	1.8	1.5
Δ de reducción	1.0	1.1	1.7	1.0	1.4	2.0	1.4	2.2	2.5



CUADRO N° 22. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas MDC-2

	GRADACIÓN MDC-2 % Va (iniciales) = 5.0								
	IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	4.0	3.5	3.1	3.7	3.3	2.5	3.2	2.7	1.9
Δ de reducción	1.0	1.5	1.9	1.3	1.7	2.5	1.8	2.3	3.1

CUADRO N° 23. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 6% por efecto de la compactación adicional en mezclas MDC-2

	GRADACIÓN MDC-2 % Va (iniciales) = 6.0								
	IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	4.7	4.0	3.6	4.7	3.8	3.1	4.1	3.4	2.2
Δ de reducción	1.3	2.0	2.4	1.3	2.2	2.9	1.9	2.6	3.8

En los cuadros anteriores se evidencia que la susceptibilidad al cambio volumétrico en condiciones de operación se hace más severa entre mayor sea la temperatura de trabajo y mayores sean los porcentajes de Va iniciales por lo tanto en el diseño de estas mezclas (MDC-2) se debe tener cuidado en el momento de seleccionar el Pb, tratar de aplicar únicamente el promedio de la especificación de Va y así dar espacio para que una vez la mezcla sea compactada por el tránsito siga con un nivel de porcentaje de Va adecuado y no experimente altas deformaciones permanentes que den origen a ahuellamientos severos que resten funcionalidad a la carretera.

Se debe notar que la utilización de un ligante menos susceptible a la temperatura, permitiría lograr mezclas densas menos propensas al cambio volumétrico en condiciones de servicio. En Colombia a pesar que las especificaciones del INV establecen que se debe seleccionar el tipo de



asfalto de acuerdo con la temperatura media de la zona de proyecto, hay muy poca variedad de asfaltos y los costos y disponibilidad son generalmente los criterios que se aplican para su selección. Por las limitaciones en los cementos asfálticos que se tiene en el país, como ya se anotó la definición de los contenidos de ligante, Pb, debe ser juiciosa cuando se trate de mezclas MDC-2 colocadas en climas cálidos y vías de tránsito pesado, se debe optar por los Va bajos que satisfagan los estándares volumétricos, mecánicos y de susceptibilidad al agua y no se puede omitir la evaluación de la susceptibilidad al ahuellamiento

3.4.1.2. GRADACIÓN PARA SUPERPAVE

Las gráficas N° 36, N° 37 y N° 38 que se presentan a continuación muestran la respuesta a la compactación adicional bajo las diferentes temperaturas de servicio manejadas en la investigación, de las diferentes mezclas elaboradas con una granulometría SUPERPAVE que pasa por los puntos de control establecidos para el tamaño máximo nominal de 12.5 mm²⁵.

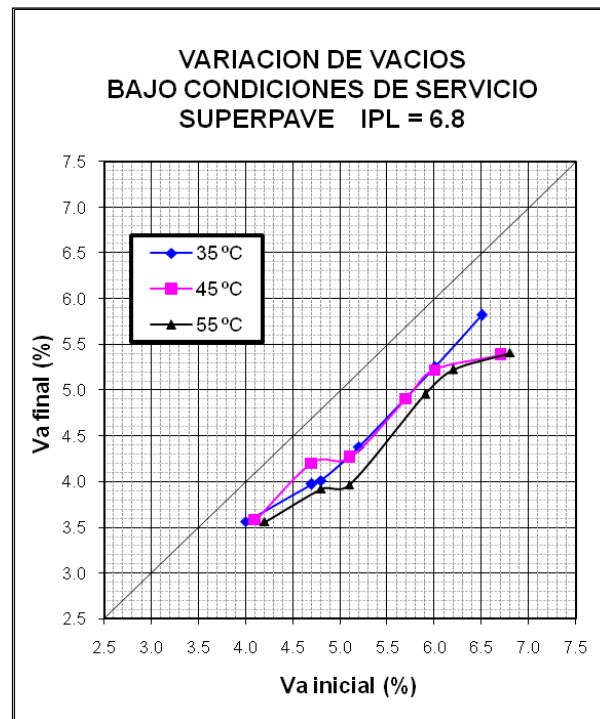
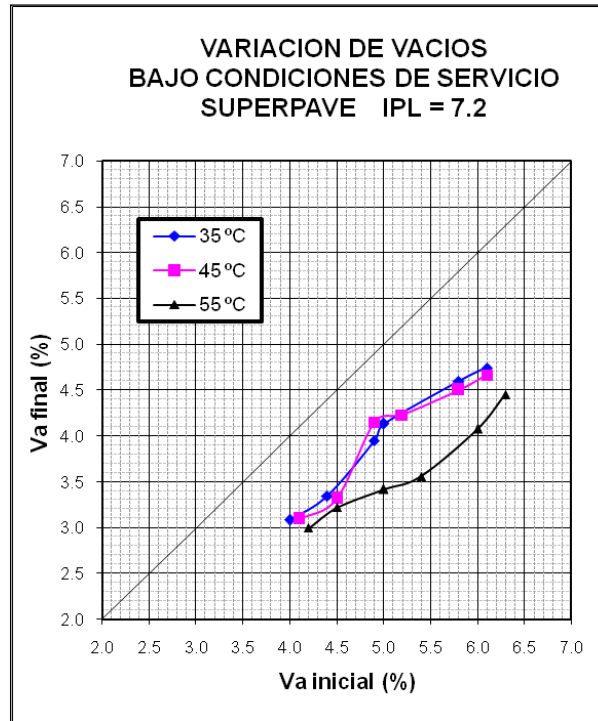
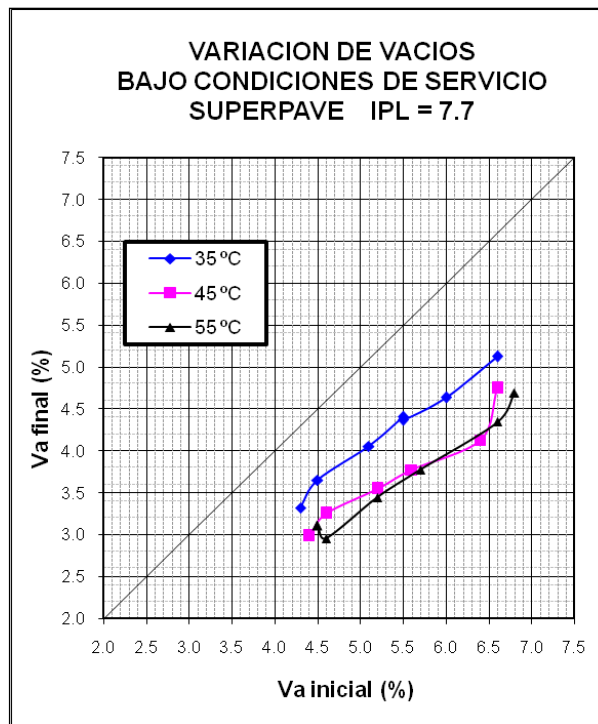


FIGURA N° 36. Respuesta a la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE con IPL de 6.8

²⁵ AASHTO. Estándar Especificación for Superpave Volumetric Mix Design. Designation M 323-04



**FIGURA N° 37. Respuesta a la compactación adicional
en mezclas SUPERPAVE con IPL de 7.2**



**FIGURA N° 38. Respuesta a la compactación adicional
en mezclas SUPERPAVE con IPL de 7.7**



Si se compara el comportamiento de las mezclas elaboradas con gradación SUPERPAVE y las elaboradas con gradación MDC – 2, se evidencia, que la utilización de gradaciones alejadas de la de máxima densidad, que aunque son ásperas y de difícil compactación en el proceso constructivo, tienen un excelente comportamiento en servicio en lo que al cambio volumétrico se refiere, son poco susceptibles a la compactación adicional por el tránsito y por lo tanto su tendencia al ahuellamiento es baja. Calidad que pretende el método de diseño Superpave al proporcionar los requerimientos granulométricos en sus especificaciones.

Las mezclas con gradación Superpave y con IPL de 6.8 y 7.2, presentan un comportamiento similar a la compactación adicional en el SCG bajo una energía de 205 giros, en donde se logran unos vacíos de aire finales en la mezcla iguales tanto a la temperatura de servicio de 35 como de 45°C. Para el IPL de 7.7 se observa que la mezcla tiene una mayor variación volumétrica a la compactación adicional, ver cuadros N° 24, N° 25 y N° 26.

CUADRO N° 24. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 4% por efecto de la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE

	GRADACIÓN SUPERPAVE % Va (iniciales) = 4.0								
	IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	3.6	3.5	3.4	3.1	3.0	2.8	3.0	2.7	2.5
Δ de reducción	0.4	0.5	0.6	0.9	1.0	1.2	1.0	1.3	1.5



CUADRO N° 25. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE

	GRADACIÓN SUPERPAVE % Va (iniciales) = 5.0								
	IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	4.2	4.2	3.9	4.1	4.2	3.4	4.0	3.5	3.3
Δ de reducción	0.8	0.8	1.1	0.9	0.8	1.6	1.0	1.5	1.7

CUADRO N° 26. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 6% por efecto de la compactación adicional en mezclas SUPERPAVE

	GRADACIÓN SUPERPAVE % Va (iniciales) = 6.0								
	IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	5.2	5.2	5.1	4.7	4.6	4.1	4.6	3.9	3.9
Δ de reducción	0.8	0.8	0.9	1.3	1.4	1.9	1.4	2.1	2.1

Cuando se dan incrementos sustanciales en el IPL (de 6.8 a 7.7) y temperaturas de servicio de 35 y 45°C, se presenta en mayor grado la densificación adicional de la mezcla con respecto a los resultados obtenidos para incrementos en el IPL de 6.8 a 7.2; igualmente mezclas con esta gradación tienen mayores variaciones volumétricas, lo que implica mayor densificación y mayor susceptibilidad al ahuellamiento bajo temperaturas de servicio de 55°C.

Si se comparan los Δ de reducción por compactación adicional en condiciones de servicio de las mezclas MDC-2 y de las SUPERPAVE se encuentra que estas últimas tienen valores significativamente inferiores en todos los casos.



En Colombia se están conjugando una serie de condiciones críticas para favorecer el ahuellamiento, como son:

- Las gradaciones MDC-2 son las más utilizadas,
- En los últimos años los volúmenes y la carga del tránsito se ha incrementado,
- En algunos proyectos se manejan temperaturas muy elevadas en las carpetas asfálticas durante prácticamente todo el año y
- No se hace una rigurosa selección del ligante.

Situaciones que sugiere orientar la tecnología de las mezclas asfálticas en Colombia hacia la utilización de otro tipo de granulometrías en el caso de proyectos para condiciones críticas. Se debe considerar entonces la fabricación de las mezclas con gradaciones ásperas que disminuyan la tendencia al ahuellamiento.

3.4.1.3. GRADACIÓN PARA MSC-2

Las gráficas N° 39, N° 40 y N° 41 presentadas a continuación muestran la respuesta, de las diferentes mezclas elaboradas con granulometría para MSC-2, recientemente incluida en las especificaciones de INV para mezclas asfálticas en caliente artículo 450-07, a la compactación adicional bajo las diferentes temperaturas de servicio manejadas en la investigación.

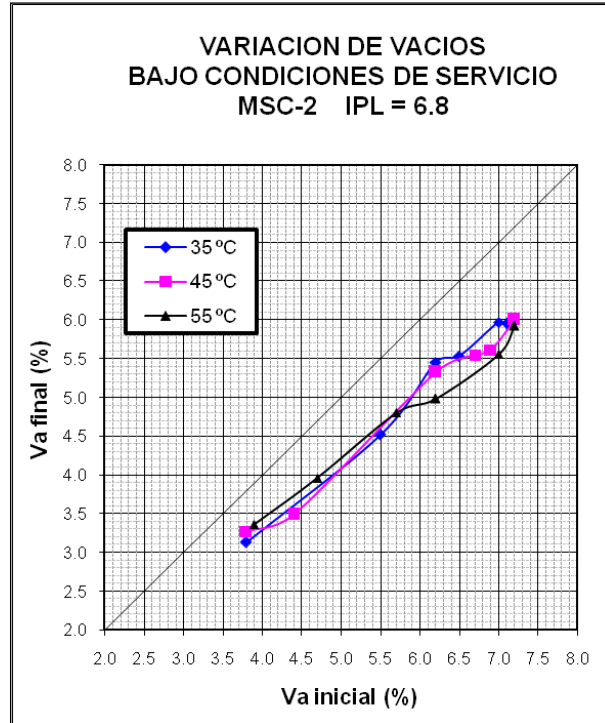


FIGURA N° 39. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2 con IPL de 6.8

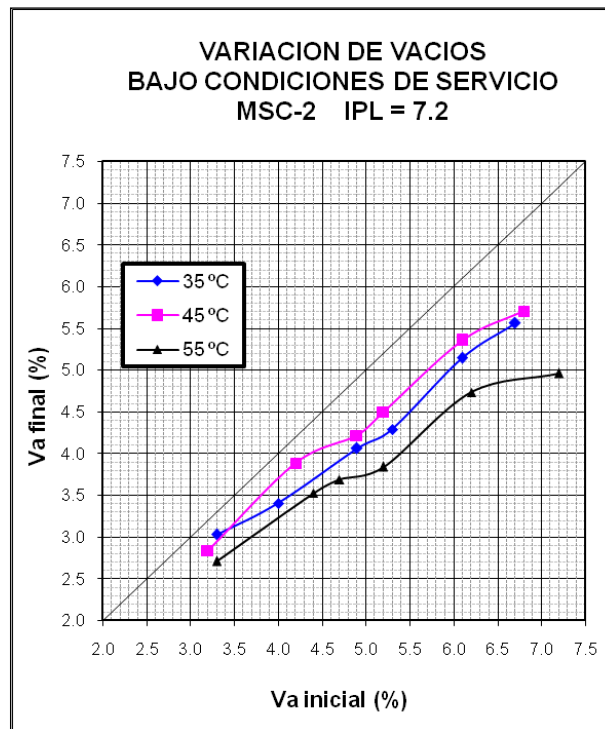
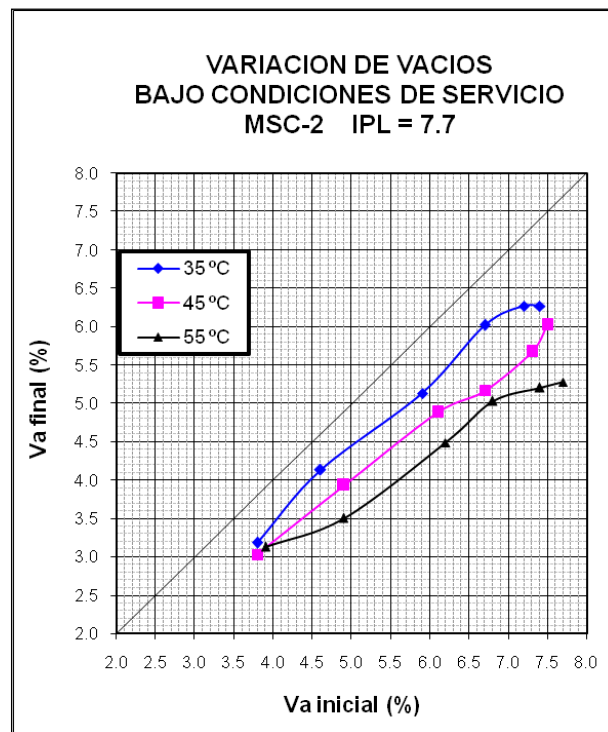


FIGURA N° 40. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2 con IPL de 7.2



**FIGURA N° 41. Respuesta a la compactación adicional
en mezclas MSC-2 con IPL de 7.7**

Para la mezcla MSC-2 y un IPL de 6.8, la compactación adicional a diferentes temperaturas de servicio analizadas, produce un efecto similar en el cambio volumétrico lo que significa que no son susceptibles a la temperatura de servicio. Con las temperaturas de 35, 45 y 55°C con IPL de 6.8, 7.2 y 7.7, se presenta un efecto parecido en la compactación adicional en las mezclas, es decir no incide de forma significativa las condiciones de temperatura y el IPL, claro está que para las condiciones críticas, IPL alto y temperatura de servicio alta, la respuesta a la compactación adicional de mezclas es la más intensa pero a niveles de Δ de reducción más bajos que con las gradaciones anteriores, tal como se muestra en los cuadros N° 27, N° 28 y N° 29.



CUADRO N° 27. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 4% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2

GRADACIÓN MSC-2 % Va (iniciales) = 4.0									
IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7			
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	3.3	3.3	3.4	3.4	3.7	3.2	3.4	3.2	3.2
Δ de reducción	0.7	0.7	0.6	0.6	0.3	0.8	0.6	0.8	0.8

CUADRO N° 28. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2

GRADACIÓN MSC-2 % Va (iniciales) = 5.0									
IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7			
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va(finales)	4.1	4.1	4.2	4.1	4.3	3.7	4.4	4.0	3.6
Δ de reducción	0.9	0.9	0.8	0.9	0.7	1.3	0.6	1.0	1.4

CUADRO N° 29. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 6% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2

GRADACIÓN MSC-2 % Va (iniciales) = 6.0									
IPL=6.8			IPL=7.2			IPL=7.7			
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	5.1	5.2	4.9	5.1	5.3	4.6	5.2	4.8	4.3
Δ de reducción	0.9	0.8	1.1	0.9	0.7	1.4	0.8	1.2	1.7



3.4.1.4. GRADACIÓN PARA MSC-2-A

Las gráficas N° 42 y N° 43 que se presentan a continuación muestran la respuesta, de las diferentes mezclas elaboradas con granulometría para MSC-2, a la compactación adicional bajo las diferentes temperaturas de servicio manejadas en la investigación.

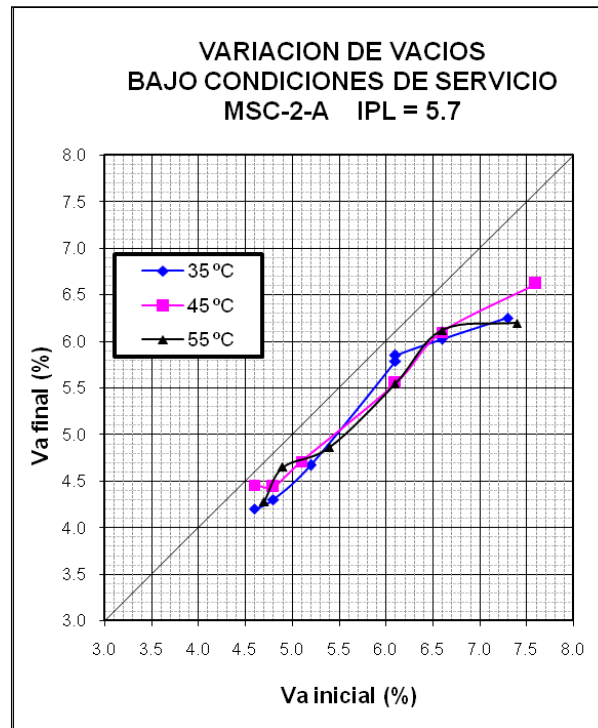


FIGURA N° 42. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2-A con IPL de 5.7

La distribución de tamaños de esta gradación tiende al límite superior de la especificación para MSC-2, por lo que se la ha llamado en este estudio como MSC-2-A.

Para la gradación MSC-2-A con IPL de 5.7 se puede observar un efecto parecido en el momento de la compactación adicional para las temperaturas de servicio de 35, 45 y 55°C, de igual forma para un IPL de 6.0 la tendencia de densificación es similar, nótese en el cuadro N° 30 que el cambio volumétrico de la mezcla a una temperatura de servicio de 55°C es mayor cuando se incrementa el IPL.

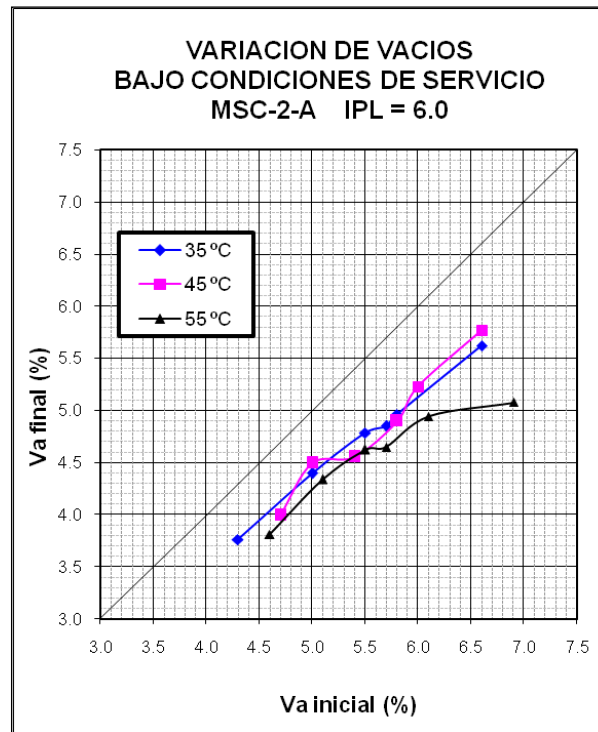


FIGURA N° 43. Respuesta a la compactación adicional en mezclas MSC-2-A con IPL de 6.0

CUADRO N° 30. Variación del % de Va para un valor de Va inicial del 5% por efecto de la compactación adicional en mezclas MSC-2-A

	GRADACION MSC-2-A % Va (iniciales) = 5.0					
	IPL=5.7			IPL=6.0		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
% Va (finales)	4.5	4.6	4.7	4.4	4.5	4.2
Δ de reducción	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.8

En términos generales, las mezclas evaluadas con las dos gradaciones MSC-2 presentan una tendencia a la reducción volumétrica por compactación adicional menor que las elaboradas con granulometría SUPERPAVE, por lo tanto en proyectos con niveles de tránsito importantes y



localizados en zonas de clima cálido, el empleo de este tipo de gradaciones resulta una alternativa viable para controlar el ahuellamiento de los pavimentos asfálticos.

3.4.2. ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL IPL EN LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS A LA COMPACTACIÓN ADICIONAL EN CONDICIONES DE SERVICIO.

Siguiendo con el análisis de susceptibilidad a la compactación adicional en condiciones de servicio, se presentan a continuación gráficos en los que se muestra la respuesta a la compactación de las mezclas estudiadas con una cantidad de ligante que proporciona igual IPL.

3.4.2.1. MEZCLAS CON IPL DE 6.8

En esta parte del análisis resulta fundamental citar que algunas normativas para diseño de mezclas en caliente, como el caso de las especificaciones IDU-ET-2005 sección 510-05, sugieren o exigen que el IPL sea de 7.5.

Se observa en las figuras N° 44, N° 45 y N°46, que las mezclas asfálticas elaboradas con IPL de 6.8, más bajo que el recomendado por algunas especificaciones a temperatura baja de trabajo, tienen un comportamiento similar y prácticamente independiente de la granulometría. A medida que la temperatura sube se pone de manifiesto la incidencia de la gradación y por sobre todo la alta susceptibilidad a la compactación adicional que tienen las mezclas MDC-2.

Las mezclas SUPERPAVE y MSC-2 reflejan un comportamiento de densificación adicional semejante en cada una de las temperaturas de servicio. Para un porcentaje dado de V_a inicial, no se aprecia una variabilidad significativa a medida que se incrementa la temperatura, tal como se ve en el cuadro N° 31.

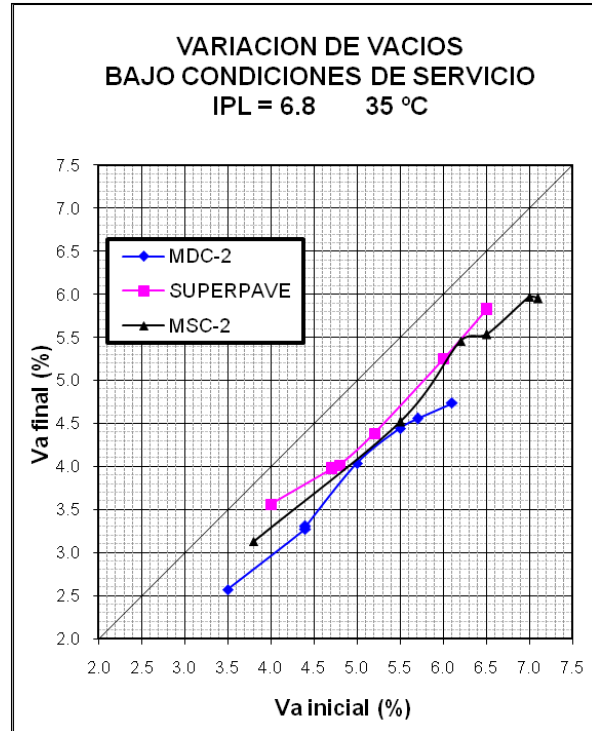


FIGURA N° 44. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 6.8 y temperatura de servicio de 35°C

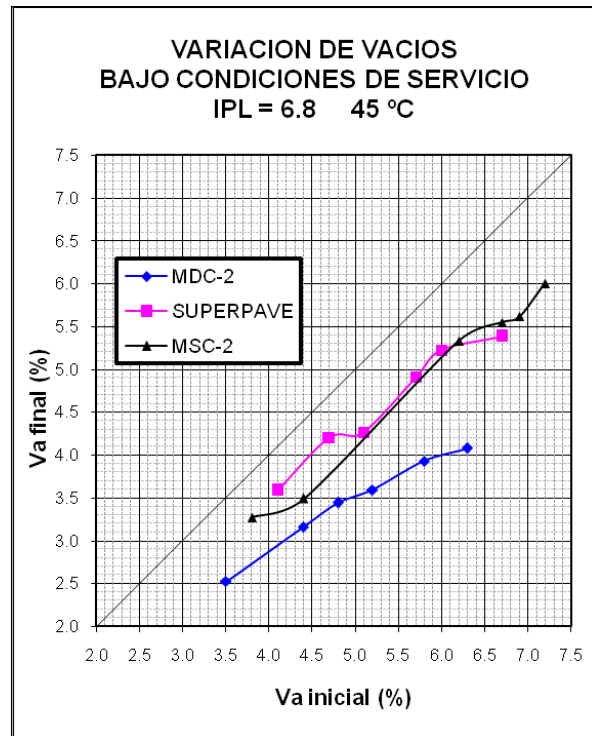


FIGURA N° 45. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 6.8 y temperatura de servicio de 45°C

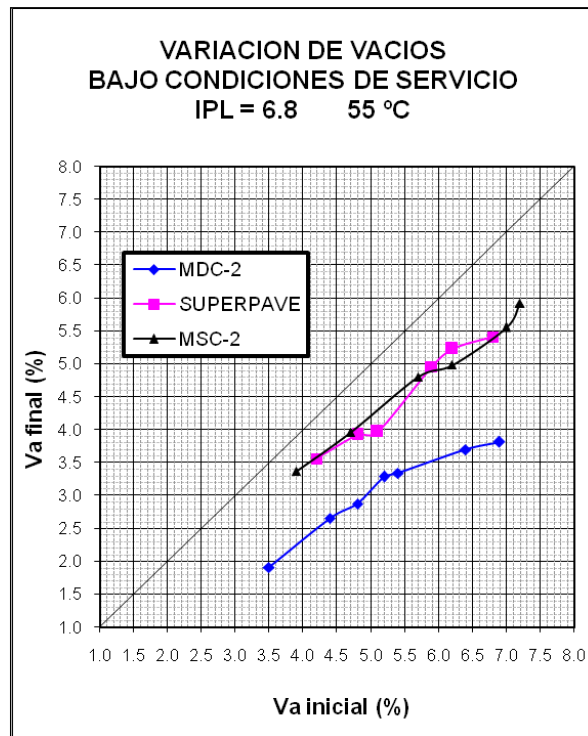


FIGURA N° 46. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 6.8 y temperatura de servicio de 55°C

CUADRO N° 31. % de Va finales para valores de % de Va inicial del 4, 5 y 6 por efecto de la compactación adicional las mezclas con IPL de 6.8

GRADACIÓN	% Va (iniciales)= 4.0 IPL=6.8			% Va (iniciales)= 5.0 IPL=6.8			% Va (iniciales)= 6.0 IPL=6.8		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
MDC-2	3.0	2.8	2.7	4.0	3.5	3.1	4.7	4.0	3.6
SUPERPAVE	3.3	3.5	3.4	4.1	4.2	3.9	5.3	5.2	5.1
MSC-2	3.6	3.3	3.4	4.2	4.1	4.2	5.2	5.1	4.9

En general se puede observar que para el IPL de 6.8 no se presentan apreciables cambios volumétricos por compactación adicional, la mezcla cuya densificación adicional es mayor y más sensible a las temperaturas de servicio es la elaborada con gradación tipo MDC-2, lo que permite afirmar que a pesar de tener IPL bajo tiene tendencia al ahuellamiento.



3.4.2.2. MEZCLAS CON IPL DE 7.2

Con el IPL de 7.2 se presentan en general mayores cambios volumetricos y se evidencia más la diferencia del comportamiento de las mezclas elaboradas con las tres gradaciones cuando las temperaturas de servicio son de 45 y 55°C. Las mezclas SUPERPAVE y MSC-2 presentan una reducción de vacíos de aire menor que las MDC-2, ver figuras N° 47, N° 48 y N° 49.

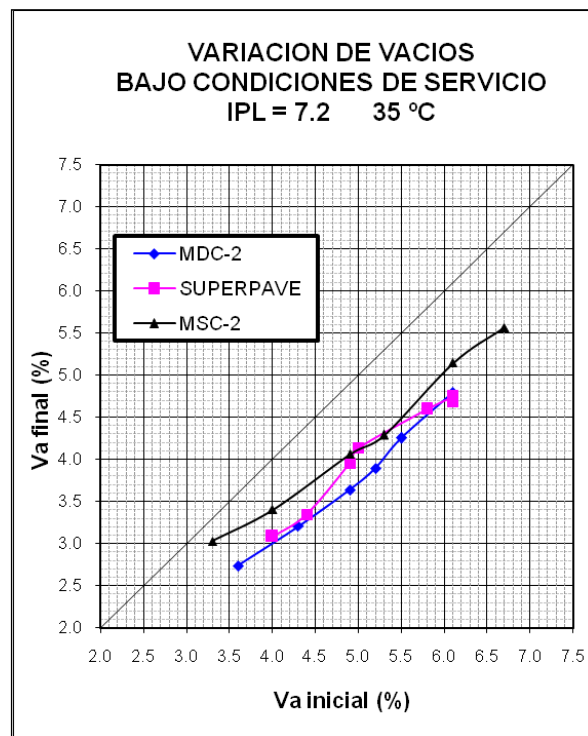


FIGURA N° 47. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.2 y temperatura de servicio de 35°C

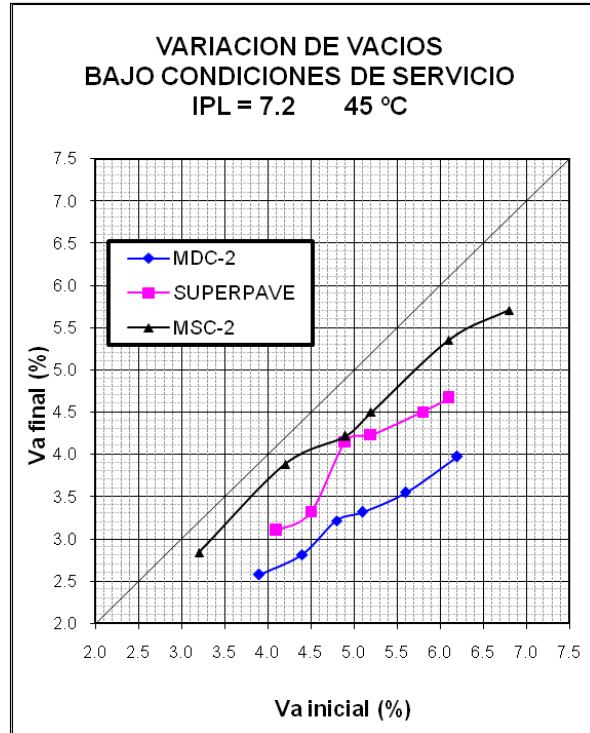


FIGURA N° 48. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.2 y temperatura de servicio de 45°C

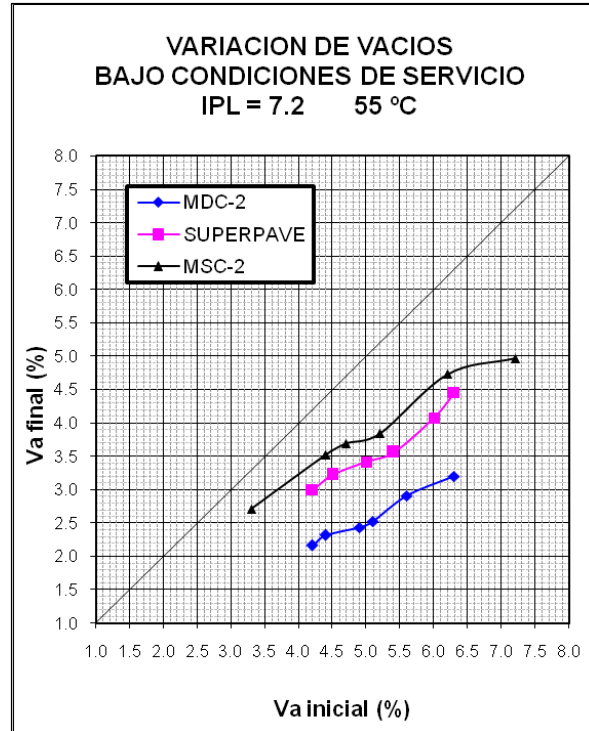


FIGURA N° 49. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.2 y temperatura de servicio de 55°C



Los cuadros N° 31 y N° 32 muestran que al incrementar el IPL, (6.8 a 7.2) se presenta un aumento en la densificación adicional de las mezclas para las diferentes temperaturas de servicio. Las mezclas SUPERPAVE presentan una respuesta más intensa a la compactación adicional que las mezclas MSC-2, ya que se aleja más del comportamiento ideal representado por la recta de 45°(ningun cambio volumetrico por compactación adicional). Con el incremento de IPL se observa claramente la mayor tendencia al cambio volumétrico de las mezclas MDC-2 y de forma más significativa al aumentar las temperaturas de trabajo.

CUADRO N° 32. % de Va finales para valores de % de Va inicial del 4, 5 y 6 por efecto de la compactación adicional las mezclas con IPL de 7.2

GRADACIÓN	% Va (iniciales)= 4.0 IPL=7.2			% Va (iniciales)= 5.0 IPL=7.2			% Va (iniciales)= 6.0 IPL=7.2		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
MDC-2	3.0	2.6	2.0	3.7	3.3	2.5	4.7	3.8	3.1
SUPERPAVE	3.1	3.1	2.7	4.2	4.2	3.4	4.7	4.6	4.1
MSC-2	3.4	3.7	3.2	4.1	4.3	3.7	5.0	5.3	4.6

Al igual que el análisis realizado para el IPL de 6.8 se tiene que de las tres mezclas estudiadas la MDC-2 es aquella que es más sensible a la densificación adicional a medida que se incrementa el IPL y la temperatura de servicio, de igual forma las MSC-2 presentan la mejor respuesta a la densificación adicional para las tres temperaturas de servicio, ratificando una vez más que las mezclas ásperas son menos sensibles al ahuellamiento.

Como conclusión general se tiene que a medida que el IPL aumenta la granulometría de la mezcla incide en mayor grado en la susceptibilidad de las mezclas a la compactación adicional en condiciones de servicio y de manera más pronunciada cuando las temperaturas de trabajo son mayores.



3.4.2.3. MEZCLAS CON IPL DE 7.7

Al igual que el análisis realizado para el IPL de 6.8 y el IPL de 7.2 se tiene que de las tres mezclas la MDC-2 es más sensible a la densificación a medida que se incrementa el IPL y la temperatura de servicio, así mismo la mezcla MSC-2 es la menos sensible a la compactación adicional.

Las figuras N° 50, N° 51 y N° 52 muestran que las mezclas con IPL de 7.7 tienen una mayor respuesta a la compactación adicional a medida que se incrementa la temperatura de servicio; lo que no se observa de forma general en las mezclas SUPERPAVE y MDC-2 con el IPL de 6.8 y 7.2, en las cuales el cambio volumétrico no es significativo en las temperaturas de trabajo de 35 y 45°C.

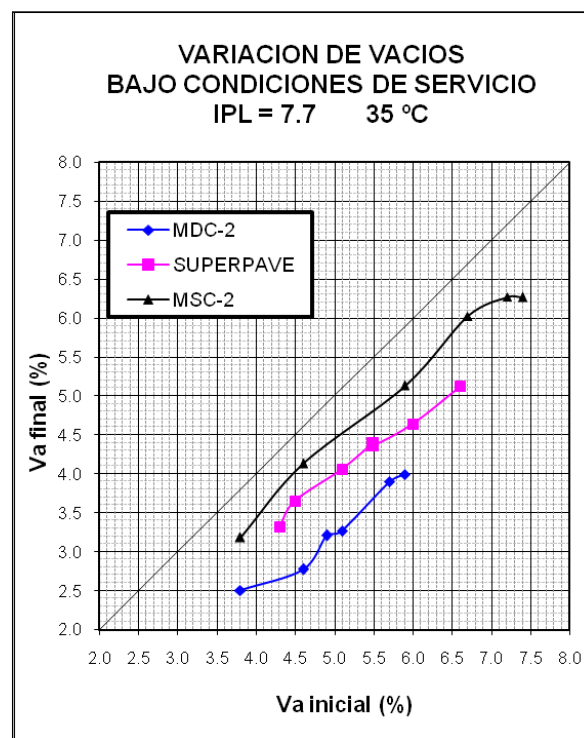


FIGURA N° 50. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.7 y temperatura de servicio de 35°C

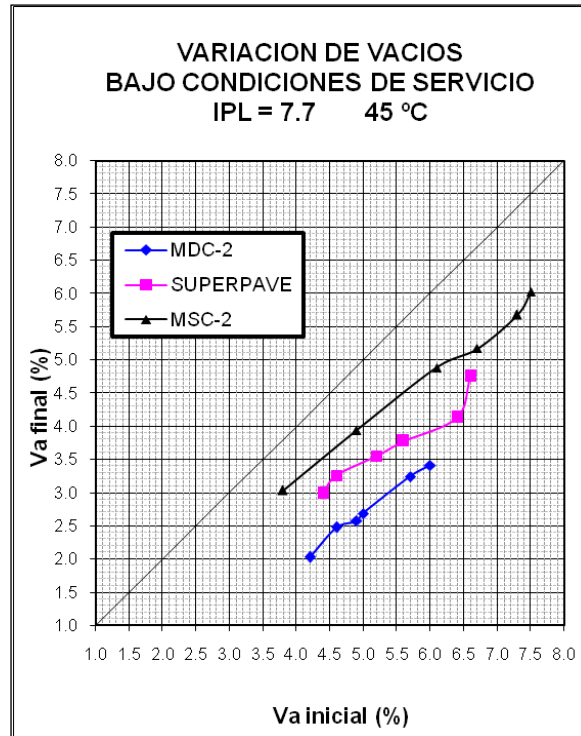


FIGURA N° 51. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.7 y temperatura de servicio de 45°C

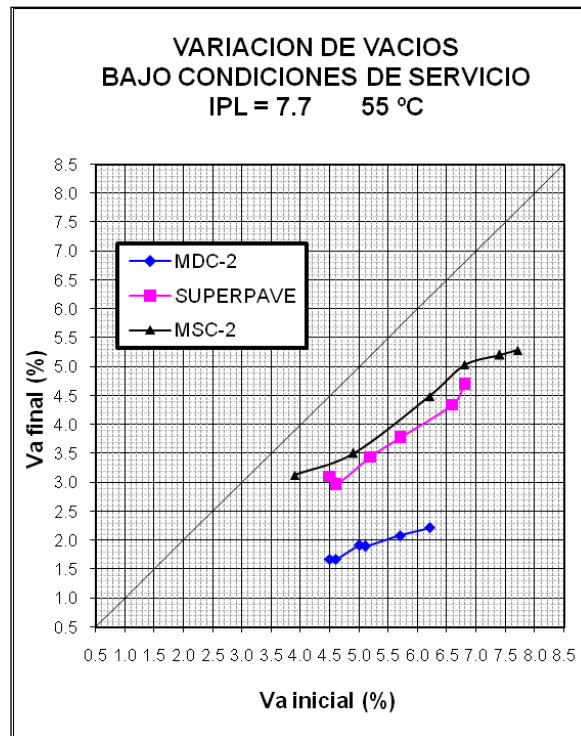


FIGURA N° 52. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 7.7 y temperatura de servicio de 55°C



Las mezclas SUPERPAVE reflejan un comportamiento de densificación adicional semejante en las temperaturas de servicio de 45 y 55°C, tal como se aprecia en el cuadro N° 33, lo que lleva a concluir que la temperatura en este caso no es un factor determinante en el parámetro de densificación evaluado, ya que este se mantiene constante.

CUADRO N° 33. % de Va finales para valores de % de Va inicial del 4, 5 y 6 por efecto de la compactación adicional las mezclas con IPL de 7.7.

GRADACIÓN	% Va (iniciales)= 4.0 IPL=7.7			% Va (iniciales)= 5.0 IPL=7.7			% Va (iniciales)= 6.0 IPL=7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
MDC-2	2.6	1.7	1.5	3.2	2.7	1.9	4.1	3.4	2.2
SUPERPAVE	2.9	2.5	2.5	4.0	3.4	3.3	4.7	3.9	3.9
MSC-2	3.4	3.2	3.2	4.5	4.0	3.6	5.2	4.8	4.3

Se confirma una vez más que a medida que el IPL aumenta las características de la granulometría de las mezclas inciden en mayor grado en la susceptibilidad de estas a la compactación adicional en condiciones de servicio y de manera más pronunciada cuando las temperaturas de trabajo son mayores.

Las mezclas MDC-2 presentan mayor susceptibilidad a la compactación adicional, tendencia que se hace más crítica cuando los IPL son cercanos al recomendado 7.5, y para temperatura de trabajo elevadas, con base en esto y analizando la incidencia del IPL se confirma que las mezclas con gradaciones MDC-2 se deben diseñar con la cantidad de ligante más pequeña que permita controlar los estándares establecidos por la especificación.

3.4.2.4. MEZCLAS MSC-2-A CON IPL DE 5.7 Y 6.0

Las gráficas N° 53, N° 54 y N° 55 muestran la respuesta a la compactación de mezclas asfálticas elaboradas con la gradación denominada MSC-2-A, que no se pudo manejar con los IPL de 6.8, 7.2 y 7.7 porque las mezclas para estos IPL mostraron un exceso de asfalto.

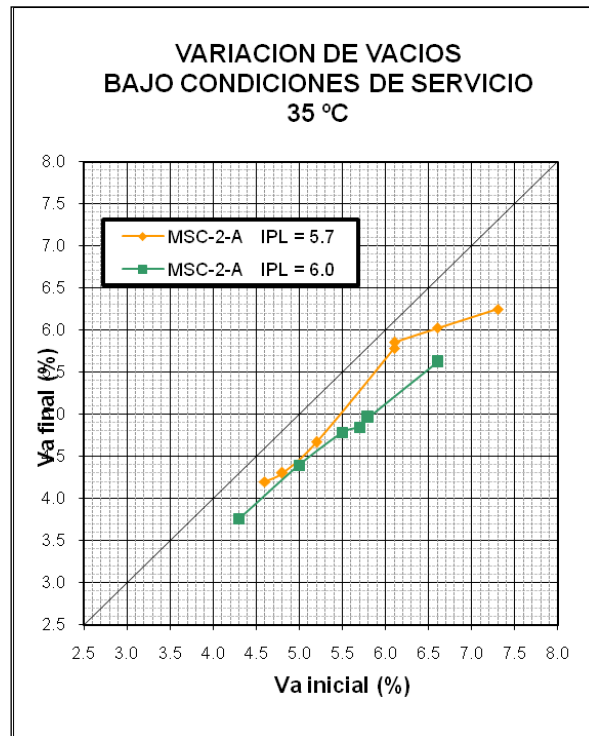


FIGURA N° 53. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 5.7 y 6.0 y temperatura de servicio de 35°C

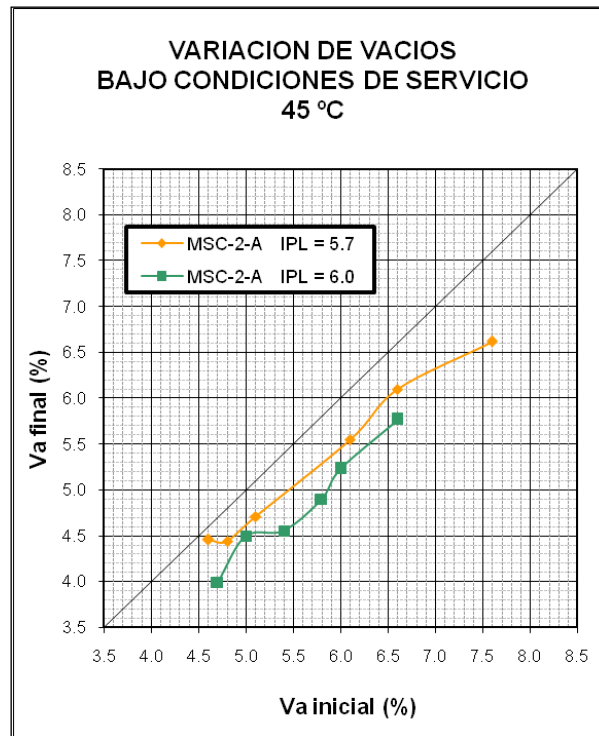


FIGURA N° 54. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 5.7 y 6.0 y temperatura de servicio de 45°C

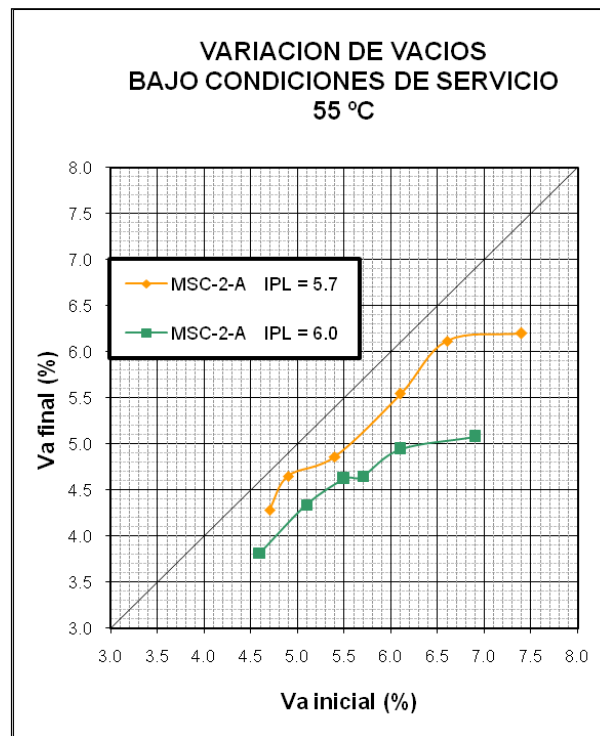


FIGURA N° 55. Respuesta a la compactación adicional en las mezclas con IPL de 5.7 y 6.0 y temperatura de servicio de 55°C

3.4.3. ANÁLISIS INTEGRAL DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS A LA COMPACTACIÓN ADICIONAL EN CONDICIONES DE SERVICIO.

En las siguientes gráficas se muestra la variación volumétrica, expresada como porcentaje de variación respecto a los porcentajes de vacíos de aire (Va) iniciales, de las diferentes mezclas analizadas en esta investigación al ser sometidas a la compactación adicional, 205 giros en SCG, en las tres condiciones ambientales de servicio simuladas, (35, 45 y 55°C). A pesar de no contar con un intervalo idéntico de vacíos de aire iniciales (% Va) para las diferentes mezclas, por la dificultad para reproducir unas determinadas características volumétricas que se tuvo durante la etapa de laboratorio, se considera suficientemente parecido para hacer comparaciones de las tres mezclas.

En la gráfica N° 56 se muestran el comportamiento general de las mezclas elaboradas con las tres granulometrías y una cantidad de ligante que garantiza un IPL de 6.8, en ella se aprecia claramente



lo que se ha venido deduciendo en los anteriores análisis. Las mezclas que para tres condiciones de servicio presentan una reducción considerable de los vacíos es la MDC-2, reducciones entre 22.5 y 41.0%, más altas a medida que aumenta la temperatura de servicio. Las mezclas SUPERPAVE y MSC-2 tienen un comportamiento semejante y mejor que la MDC-2 dado que la variación volumétrica oscila entre 13.6 y 18.0%.

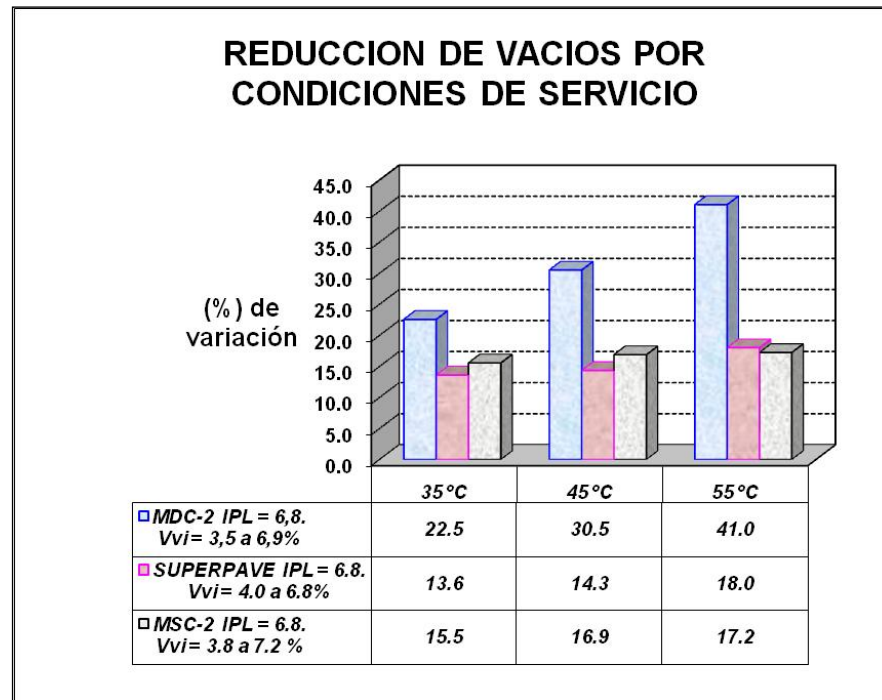


FIGURA N° 56. Variación volumétrica de las mezclas con IPL de 6.8

Como ilustración se hace el siguiente análisis: considerando que la compactación adicional aplicada en el laboratorio simula el efecto del tránsito se podría afirmar con base en la información mostrada en la figura N° 56, que si una mezcla tipo MDC-2 con IPL de 6.8 queda con vacíos iniciales de aire durante la construcción del 5%, el tránsito, bajo una temperatura de servicio de 55 °C reducirá estos en un valor aproximado al 41% lo que equivale a dejar la mezcla con unos vacíos finales de aire del 3.0%. Si se consideran las temperaturas de 35 y 45°C, la reducción de vacíos de aire en la mezcla es del orden del 22.5 y 30.5% equivalentes a unos vacíos finales de aire del 3.9 y 3.5% respectivamente, ver cuadros N° 16, N° 17 y N° 18.

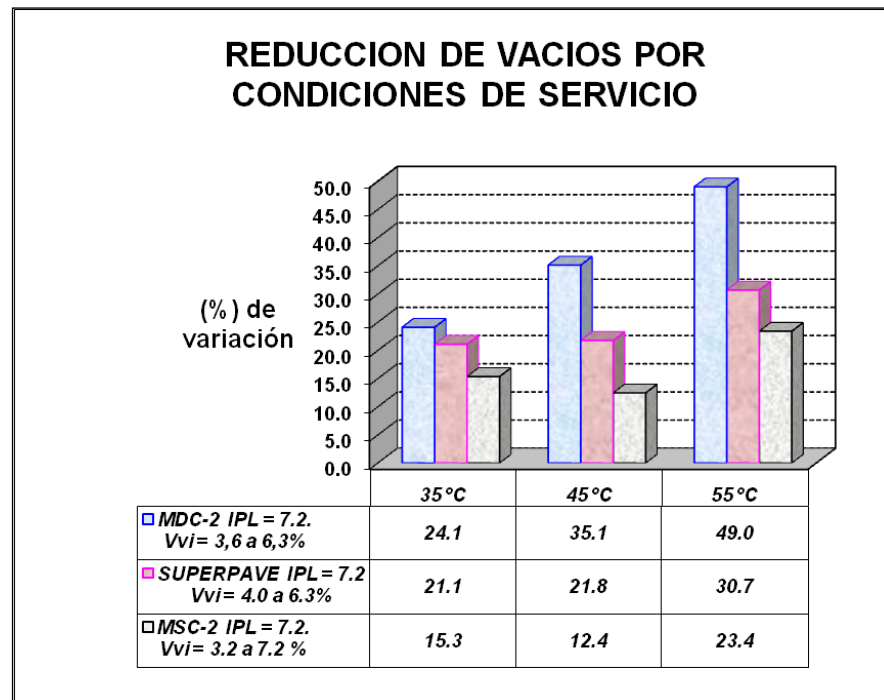


FIGURA N° 57. Variación volumétrica de las mezclas con IPL de 7.2

En la gráfica N° 57, correspondiente al IPL de 7.2, se puede observar en primer término que las mezclas se hacen, como era de esperar, más sensibles a las condiciones de servicio. En segundo término se tiene en general una mayor tendencia a la reducción volumétrica y por último se aprecia que ya no es tan semejante el comportamiento de las mezclas SUPERPAVE y MSC-2 pero si conservan su superioridad frente a la MDC-2, ya que su reducción volumétrica sigue siendo inferior. Se debe destacar que a la temperatura de 35°C el comportamiento de las tres mezclas es más semejante que para el IPL de 6.8.

Como ilustración se hace el siguiente análisis: considerando que la compactación adicional aplicada en el laboratorio simula el efecto del tránsito se podría afirmar con base en la información mostrada en la figura N° 57 que si una mezcla tipo MDC-2 queda con vacíos (Va) iniciales de aire durante la construcción del 5%, el tránsito, bajo una temperatura de servicio de 55°C reducirá estos en un valor aproximado al 49.0% lo que equivale a dejar la mezcla con unos vacios finales de aire del 2.6%. Al considerar los tipos de mezcla SUPERAPVE y MSC-2, la reducción



de vacíos de aire bajo esta misma temperatura es del orden de 30.7 y 23.4% equivalentes a unos vacíos finales de aire del 3.5 y 3.8% respectivamente, ver cuadros N° 34, N° 35 y N° 36.

Las mezclas SUPERPAVE reflejan una tendencia a la reducción volumétrica muy similar a las temperaturas de servicio de 35 y 45°C, pero a 55°C se observa un incremento en el valor de la reducción de vacíos de aire, por lo que se puede afirmar que la susceptibilidad térmica del ligante juega un papel importante en el control volumétrico a medida que se incrementa su cantidad.

La mezcla MSC-2 refleja una respuesta a la compactación adicional inesperada a la temperatura de servicio de 45°C, es decir se esperaba que a medida que incrementase la temperatura la reducción de vacíos de aire fuese paulatinamente superior; este comportamiento lo puede ocasionar la segregación producida por la presencia de mayor cantidad de partículas de tamaño grueso en la gradación lo cual implica un acomodo errático de las partículas en el momento de la elaboración de las probetas.

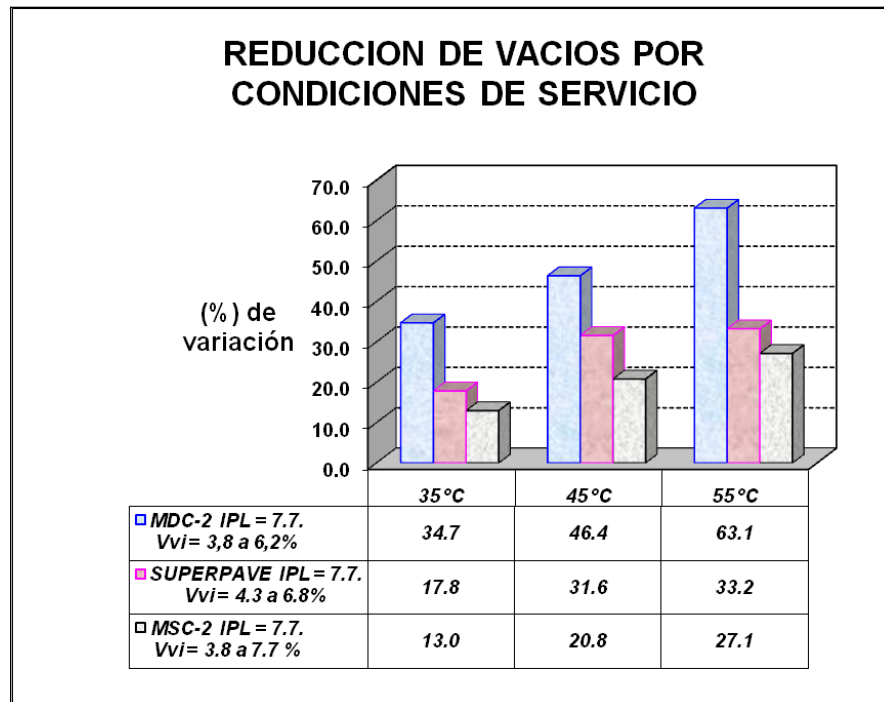


FIGURA N° 58. Variación volumétrica de las mezclas con IPL de 7.7



En términos generales se aprecia en la gráfica N° 57 que la reducción de los vacíos iniciales de aire es mayor en las mezclas a medida que la condición de temperatura de servicio aumenta.

La gráfica N° 58, correspondiente al IPL de 7.7 evidencia que las mezclas MDC-2 experimentan una reducción volumétrica notoriamente más alta que para los IPL más bajos, entre 34.7 y 63.1%, por lo que queda en evidencia nuevamente que estas mezclas presentan gran tendencia al ahuellamiento cuando las cantidades de ligante están cercanas a las recomendadas en algunas especificaciones (IPL=7.5), en cambio las otras dos mezclas tienen comportamientos similares al encontrado con los IPL más bajos.

La variación de la temperatura de servicio de 45 a 55 °C no afecta el comportamiento de las mezclas Superpave a pesar de tener un IPL importante, 7.7. Como ilustración se hace el siguiente análisis: considerando que la compactación adicional aplicada en el laboratorio simula el efecto del tránsito se podría afirmar con base en la información mostrada en la gráfica N° 58 que si una mezcla Superpave queda con vacíos iniciales de aire durante la construcción del 4%, el tránsito bajo una temperatura de servicio de 35°C, reducirá estos en un valor aproximado al 17.8% lo que equivale a dejar la mezcla con unos vacíos finales de aire del 3.3%. Considerando las temperaturas de servicio de 45 y 55°C la reducción de vacíos de aire es del orden del 31.6 y 33.2% equivalentes a unos vacíos finales de aire del 2.7% para cada condición, ver cuadros N° 34, N° 35 y N° 36.

De igual forma, la gráfica N° 58 permite ratificar lo expresado en los análisis anteriores, en los que la reducción de los vacíos iniciales de aire es mayor en cada tipo de mezcla a medida que la condición de temperatura de servicio aumenta.

CUADRO N° 34. % de Va finales para valores de Va inicial de 4% por efecto de la compactación adicional de las mezclas con los IPL de trabajo

	IPL = 6.8			IPL = 7.2			IPL = 7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
MDC-2. Va = 4%	3.1	2.8	2.4	3.0	2.6	2.0	2.6	2.1	1.5
SUPERAPAVE. Va = 4%	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	2.8	3.3	2.7	2.7
MSC-2. Va = 4%	3.4	3.3	3.3	3.4	3.5	3.1	3.5	3.2	2.9



CUADRO N° 35. % de Va finales para valores de Va inicial de 5% por efecto de la compactación adicional de las mezclas con los IPL de trabajo

	IPL = 6.8			IPL = 7.2			IPL = 7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
MDC-2. Va = 5%	3.9	3.5	3.0	3.8	3.2	2.6	3.3	2.7	1.8
SUPERPAVE. Va = 5%	4.3	4.3	4.1	3.9	3.9	3.5	4.1	3.4	3.3
MSC-2. Va = 5%	4.2	4.2	4.1	4.2	4.4	3.8	4.4	4.0	3.6

CUADRO N° 36. % de Va finales para valores de Va inicial de 6% por efecto de la compactación adicional de las mezclas con los IPL de trabajo

	IPL = 6.8			IPL = 7.2			IPL = 7.7		
	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C	35°C	45°C	55°C
MDC-2. Va = 6%	4.7	4.2	3.5	4.6	3.9	3.1	3.9	3.2	2.2
SUPERPAVE. Va = 6%	5.2	5.1	4.9	4.7	4.7	4.2	4.9	4.1	4.0
MSC-2. Va = 6%	5.1	5.0	5.0	5.1	5.3	4.6	5.2	4.8	4.4

Como conclusión final se tiene que el tipo de mezcla que presenta una mayor variabilidad volumétrica por compactación adicional es la MDC-2 y mayores porcentajes de reducción de vacíos de aire a medida que se incrementa el IPL y la temperatura de servicio, igualmente la mezcla SUPERPAVE presenta mayor densificación al incrementarse el IPL, pero esta tendencia es menos pronunciada a la obtenida con las mezclas MDC-2 y más pronunciada a las mezclas MSC-2.

En este mismo sentido las mezclas MDC-2, las cuales presentan alta susceptibilidad a la compactación adicional, deben manejarse con especial cuidado en la etapa de diseño, en la selección del contenido de ligante se debe tener en cuenta dejar las mezclas con unos vacíos de aire permitidos por los estándares de las especificaciones pero que contribuyan a controlar la susceptibilidad al cambio volumétrico por compactación adicional. A lo largo de la presentación de los resultados de esta investigación se ha evidenciado que entre menos sean los porcentajes de Va iniciales (o al término de la construcción) menor es la compactación adicional y nunca omitir la evaluación de la tendencia al ahuellamiento, en especial cuando las mezclas van a estar expuestas a condiciones de altas temperaturas de servicio y de tránsito.

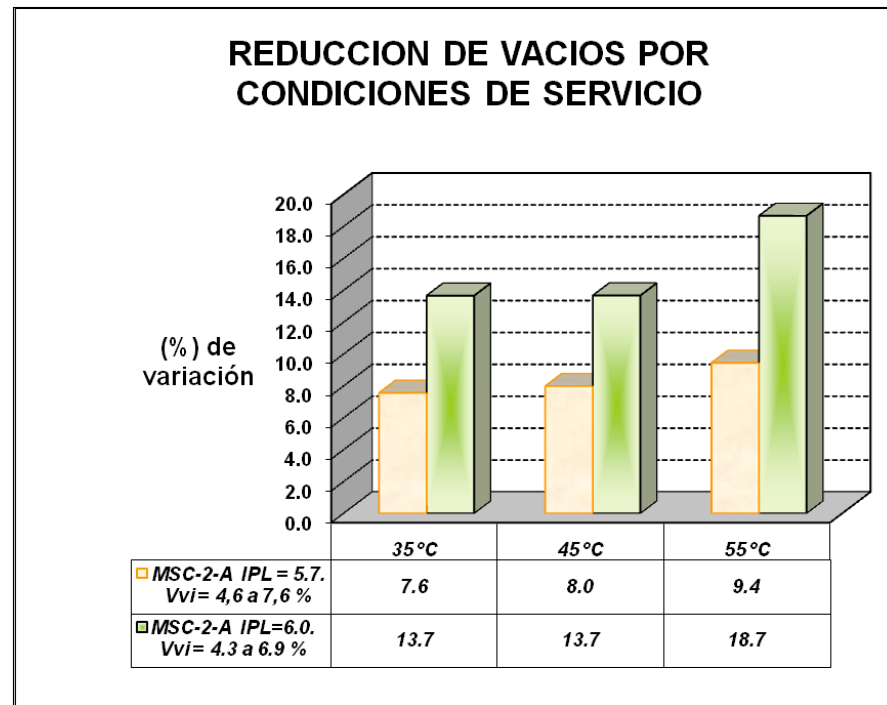


FIGURA N° 59. Variación volumétrica de las mezclas MSC-2-A con IPL de 5.7 y 6.0

La gráfica N° 59 resume la información obtenida con las mezclas MSC-2-A, en las que se dificultó manejar los IPL fijados para este estudio, y por lo tanto no se pudieron involucrar en las gráficas N° 57, N° 58 y N° 59. Sin embargo se puede concluir que estas con IPL de 6.0 presentaron una tendencia al cambio valumétrico similar a la de las mezclas MSC-2 con IPL de 6.8 cuando la temperatura de servicio es alta.

En este tipo de mezclas se observa que incrementos en el IPL y en la temperatura de servicio producen mayor densificación de la misma por compactación adicional.



Capítulo 4

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Basados en los resultados obtenidos y sus respectivos análisis, se presentan en el presente capítulo las conclusiones a las que se llegó en esta investigación y se dan algunas recomendaciones que esperamos puedan aportar al campo de las mezclas asfálticas en caliente tanto en la etapa de diseño como en la etapa de construcción y puesta en servicio.

4.1. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL G_{se} DE UN MATERIAL AL VARIAR LA GRADACIÓN Y EL CONTENIDO DE LIGANTE

- La gravedad específica efectiva del agregado (G_{se}), es una propiedad del agregado y particular para cada gradación, que no se ve influenciado en una mezcla asfáltica por la cantidad de ligante presente siempre que se mantengan constantes: la granulometría y la viscosidad del ligante en el la etapa de mezclado y además se lleve a cabo en el laboratorio un acondicionamiento durante un mínimo de dos (2) horas a una temperatura de 135°C en horno ventilado y controlado termostáticamente. Esto último para simular el tiempo que en obra la mezcla permanece caliente y durante el cual el asfalto puede penetrar en los poros permeables del agregado, porque conserva una baja viscosidad que permite el proceso de absorción.

4.2. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE TRABAJABILIDAD DE LAS MEZCLAS EN LAS CONDICIONES DE CONSTRUCCIÓN

- La gradación es una variable significativa en la trabajabilidad de las mezclas asfálticas en caliente, las mezclas elaboradas con gradación tipo MDC-2 son muy compactables, lo que no sucede con las mezclas elaboradas con gradaciones tipo MSC-2 y SUPERPAVE, en las que la
-



compactación es apreciablemente más difícil, y su respuesta está afectada por la cantidad de ligante y la energía de compactación aplicada.

- Al aumentar el IPL se produce una mejora de la trabajabilidad (se mejora el grado de homogeneidad de la respuesta a un determinado proceso de compactación) en las mezclas con gradaciones SUPERPAVE y MSC-2, mientras que las de gradación MDC-2 prácticamente conservan la respuesta al proceso de compactación, quedando claro que estas gradaciones hacen las mezclas muy trabajables y prácticamente poco sensibles a la cantidad de ligante. Las mezclas con gradación MSC-2 son las más sensibles a la variación del contenido de asfalto, debido a que su comportamiento es el más favorecido por incrementos en el IPL.
- De acuerdo a las especificaciones dadas por el IDU, en lo que respecta al requerimiento establecido de 7.5 para el IPL, se puede mencionar que este estándar tiene significado en lo que a trabajabilidad respecta en cierto tipo de mezclas como las SUPERPAVE y las MSC-2, en las que valores de IPL cercanos a los establecidos producen una mejora sustancial en la trabajabilidad de las mismas, no sucede lo mismo con las mezclas MDC-2 en las que el IPL no incide significativamente pero si su gradación.
- Las mezclas con las gradaciones de trabajo analizadas (MDC-2, SUPERPAVE y MSC-2), tienen diferente comportamiento para un mismo IPL, lo que permite posicionar a la gradación como la variable más influyente en la trabajabilidad que logran las mezclas, particularmente cuando se aplican bajas energías de compactación.
- Las mezclas elaboradas con gradación SUPERPAVE, son altamente sensibles a la viscosidad del asfalto en el momento de la compactación, es decir que pequeños cambios en la viscosidad del ligante, dados por leves cambios de temperatura en la mezcla asfáltica bajo iguales condiciones de gradación e IPL producen variaciones significativas en el contenido de vacíos de aire (Va).
- La respuesta a la compactación de las mezclas MDC-2 y MSC-2 se ve afectada por variables incontrolables tanto en el laboratorio como en el campo, estas son: la heterogeneidad de la



temperatura y la segregación, y que por lo tanto hacen difícil reproducir una volumetría deseada en cualquiera de las dos instancias.

- En el laboratorio resulta muy difícil reproducir una condición volumétrica determinada a partir de la información arrojada por un espécimen de ajuste particularmente para las mezclas MDC-2 y MSC-2, en cambio las mezclas SUPERPAVE presentan una buena reproducibilidad de la volumetría
- El declive de compactación para las mezclas MDC-2, indica que estas son notoriamente más trabajables, pero este parámetro no resulta sensible como indicativo de la incidencia de la cantidad de ligante en la trabajabilidad de las mezclas ásperas, MSC-2 y SUPERPAVE.

4.3. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE TENDENCIA A LA VARIABILIDAD VOLUMÉTRICA POR ACCIÓN DEL TRÁNSITO PESADO EN CONDICIONES DE OPERACIÓN

- En las mezclas MDC-2, la susceptibilidad al cambio volumétrico en condiciones de servicio si es sensible a la cantidad de ligante, lo que no sucedía en la etapa de fabricación, entre más ligante la mezcla tiende más al cambio volumétrico durante la operación y por lo tanto es más propensa al ahuellamiento.
 - Las mezclas MDC-2 con altos IPL son más susceptibles a la reducción del contenido de vacíos de aire (Va) por compactación adicional en la medida en que se presentan altas temperaturas de servicio, más aún el cambio volumétrico es mayor en las mezclas que tienen grandes porcentajes de Va iniciales (al término de la construcción), razón por la cual se debe en estas mezclas tener un especial cuidado en la selección del ligante y la compactación de campo con el fin de prevenir deformaciones permanentes.
 - Las mezclas alejadas de aquellas de máxima densidad como lo son las SUPERPAVE, que aunque son ásperas y de difícil compactación durante el proceso constructivo, tienen un excelente comportamiento en condiciones de servicio, es decir presentan menor
-



susceptibilidad a la variabilidad volumétrica por compactación adicional debida al tránsito y por lo tanto su tendencia al ahuellamiento es baja.

- Las mezclas MSC-2 respecto de las SUPERPAVE presentan mayor susceptibilidad al cambio volumétrico por compactación adicional en condiciones de servicio, pero son menos susceptibles respecto de las MDC-2, por lo tanto su tendencia al ahuellamiento es baja.
- De las tres mezclas trabajadas en esta investigación, la MDC-2 es la más susceptible a la compactación adicional y la más sensible a las temperaturas de servicio, tanto a IPL bajos como altos, lo que permite establecer que a pesar de tener poco ligante la mezcla sigue siendo deformable bajo la aplicación de cargas, es decir tiende al ahuellamiento. Esta tendencia se hace más crítica cuando el valor de IPL es cercano al recomendado por algunas especificaciones (7.5) y bajo temperaturas elevadas de operación.
- A medida que el IPL aumenta la granulometría de las mezclas incide en mayor grado en la susceptibilidad de las mismas a la compactación adicional en condiciones de servicio y de manera más pronunciada cuando las temperaturas de trabajo son mayores. La mezcla MDC-2 es la que presenta mayores reducciones, luego le siguen en su orden las mezclas SUPERPAVE y las MSC-2, lo que ratifica una vez más alta tendencia a las deformaciones permanentes (ahuellamientos) que presentan las mezclas densas.

4.4. RECOMENDACIONES

- Durante los procesos de control en la etapa de compactación de las mezclas asfálticas en caliente se debe ser especialmente cuidadosos debido a que son muchas las variables que inciden en la calidad del producto terminado, se deben realizar las pruebas rutinarias que se *“requieran”* para la aceptación de proyectos, más aún se deben efectuar nuevos estudios en este campo que permitan garantizar las condiciones apropiadas de la mezcla cuando esta se está colocando, principalmente en lo que concierne a la homogeneidad de la temperatura y la
-



disminución de la segregación. Estos estudios tal vez requieran de la implementación de nuevas pruebas de laboratorio, de una juiciosa selección de los equipos de construcción o simplemente de buenas prácticas, mejores técnicas y mayor compromiso en lograr un producto de excelente calidad o una conjunción de todos los medios posibles, tales que permitan mantener una mezcla asfáltica homogénea antes y durante los procesos de colocación y compactación.

- En lo referente a los estándares dados en las especificaciones tanto del INV como del IDU, se requiere hacer ciertas precisiones en cuanto a: el IPL establecido, este debe referirse a mezclas en particular y no se debe generalizar para todas ya que no representa igual comportamiento para cada una, en cuanto a los valores de porcentaje de V_a , estos se deben enmarcar en un nota que indique *“al terminar la compactación de campo con estos porcentajes debe quedar la mezcla”* y no dejar con mayores porcentajes la capa de rodadura sobre todo en mezclas densas para tránsito pesado, debido a que se producirán tempranamente deformaciones. También se recomienda ser muy cuidadoso el manejo de la exigencia de IPL en mezclas con gradaciones ásperas, ricas en agregado grueso. El IPL de 7.5 recomendado puede conducir a mezclas con exceso de asfalto. Los métodos analíticos de superficie específica disponibles en la tecnología de pavimentos, dan factores de superficie específica para los tamaños menores de 4.76 mm, y algunos al retenido le dan un factor general sin diferenciar entre los tamaños que tengan estas partículas, por esta razón estos métodos resultan adecuados en mezclas con gradaciones con importantes cantidades de arena como las tipo denso.
- Debido a que la susceptibilidad al cambio volumétrico en condiciones de operación se hace más severa en las mezclas MDC-2 entre mayor sea la temperatura de trabajo y mayores sean los porcentajes de V_a iniciales, se debe por lo tanto en el diseño de estas mezclas tener cuidado en el momento de seleccionar el P_b , tratar de aplicar únicamente el promedio de la especificación de V_a y así dar espacio para que una vez la mezcla sea compactada por el tránsito siga con un nivel de porcentaje de V_a adecuado y no experimente altas deformaciones permanentes que den origen a ahuellamientos severos que resten



funcionalidad a la carretera. La tendencia generalizada es de dejarlas con un porcentaje alto de Va para que con la compactación por tránsito llegue a los niveles adecuados de los Va, pero es una práctica que conduce a una pérdida rápida de la funcionalidad del pavimento con el agravante de dejar un tiempo la mezcla expuesta al oxígeno del aire y agua y sin la estabilidad que alcanzaría cuando los vacíos logren los valores adecuados. En el diseño se debe procurar definir fórmulas de trabajo que le den poca tendencia a la mezcla de compactación adicional por tránsito y esto se logra escogiendo un asfalto adecuado, proporcionando la cantidad justa de ligante y dejando la mezcla con unos Va que cumplan con los estándares, pero teniendo presente que entre más vacíos iniciales se tengan es mayor la susceptibilidad de la mezcla a la compactación adicional por tránsito. Sería ideal que los estándares de vacíos de aire (Va) se establecieran de forma particular para cada tipo de mezcla, dado que la susceptibilidad al cambio volumétrico de las mezclas densas y semi-densas presenta una importante diferencia, permitir altos contenidos de vacíos de aire en mezclas densas conducen a la construcción de capas de rodadura con alta susceptibilidad al ahuellamiento.

- El empleo de ligantes poco susceptibles a la temperatura, permitirá obtener mezclas densas menos propensas al cambio volumétrico en condiciones de servicio. En este aspecto el ligante no debe ser seleccionado con base en criterios de disponibilidad y costos como se hace normalmente en Colombia. Se debe igualmente contar con mayor variedad de cementos asfálticos dadas las diferentes condiciones de clima que se presentan en nuestro país.
 - Las mezclas MDC-2 que se deseen colocar en climas cálidos y vías de tránsito pesado, se recomienda que sean diseñadas y extendidas con los porcentajes de Va bajos que se establecen en los estándares de las especificaciones y con la menor cantidad de ligante que permitan garantizar las características mecánicas y de susceptibilidad al agua que se especifican y además realizar la evaluación de la tendencia de la mezcla al ahuellamiento.
 - Las mezclas densas, que son las tradicionalmente utilizadas en nuestro país, no resultan ser las más adecuadas para proyectos de vías de tránsito de nivel alto y que además estén
-



sometidas a altas temperaturas, debido a la susceptibilidad pronunciada que presentan a compactaciones adicionales por acción del tránsito. Se debe considerar otro tipo de mezclas como son las semi-densas que aunque difíciles de compactar son poco propensas al ahuellamiento. La utilización de mezclas semi- densas exige involucrar nuevas tecnologías tanto en laboratorio como en campo, pero lo principal es el cambio de mentalidad que debe hacer la comunidad profesional al respecto, más aún con las críticas condiciones Colombianas, altos volúmenes y cargas importantes del tránsito, elevadas temperaturas de las mezclas asfálticas en operación y la escasa variedad de ligantes que impide hacer una selección de acuerdo con las condiciones ambientales del proyecto. Se debe tomar consciencia que una alternativa para mejorar el comportamiento de la mezclas en Colombia es la de emplear gradaciones ásperas que reduzcan la tendencia las deformaciones.

- Se recomienda fomentar la cultura de la utilización de mezclas semi-densas, contempladas en las especificaciones de INV 07, en proyectos en climas cálidos y con tránsito altos, aunque estas exijan ajustes importantes en los procedimientos constructivos y sobre todo en el proceso de compactación.
- Los resultados de este trabajo permiten concluir que la practica de dejar las mezclas asfálticas de vías con alto tránsito con un porcentaje de vacíos alto (%Va alto) considerando que el transito proporcionará la compactación restante, se debe reevaluar, teniendo en cuenta los siguientes aspectos: – Entre mayor sea el %Va inicial mas tendencia tiene la mezcla a la compactación adicional por tránsito y por lo tanto mayor tendencia al ahuellamiento. - Se debe buscar que la mezcla una vez terminada la construcción quede con las características volumétricas ideales, aquellas en que la tendencia a la compactación adicional sea mínima, con el propósito de garantizar la estabilidad volumétrica y así tener la certeza de que se están proporcionando las condiciones que aseguran durabilidad y adecuado comportamiento mecánico. No se debe perder de vista que el transito densifica únicamente en la zona de las huellas. - La compactación adicional por el transito depende de las características de la mezcla y de las condiciones ambientales por lo tanto no se pueden establecer intervalos de



%Va únicamente en función del nivel del tránsito y de la posición de la capa, sin tener en cuenta la susceptibilidad a la compactación adicional por tránsito real.



5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENAS LOZANO Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico : capítulo 4 el asfalto. 2ed. Popayán, Colombia : FAID, 2001. p. 88-96.

BUSTOS Eduardo. Curso reciclaje de pavimentos flexibles. Popayán, Colombia : Universidad del Cauca. 1998.

ASPHALT INSTITUTE. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No 22. Lexington, USA. 1992.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Guide for mechanistic-empirical design of new rehabilitated pavement structures : appendix CC-2 estimating original air voids in GPS-LTTP sections. Illinois, USA. 2001. p. 2-21.

GÚZMAN M. María R y MARIN U. Carlos R. Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave. : capítulo 1 marco teórico. Popayán, Colombia : Universidad del Cauca. 2003. p. 29-143.

BROCK D. Segregación causas y soluciones boletín técnico T-117S, Chatagoohana. ASTEC. 2002. p. 1-34.

CHARRIER. J. Evaluation de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux apports de la termographie infrarouge. Nantes. Bulletin Laboratoire Centrales des Ponts et Chaussées N° 232. 2001. p 19-29.



REYES O. Oscar J; CAMACHO T. Javier F y REYES L. Fredy. Influencia de la temperatura y nivel de energía de compactación en las propiedades dinámicas de una mezcla asfáltica : antecedentes. Medellín, Colombia : Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. 2006. p. 123-124.

VÁSQUEZ R. Marcos V. Superpave Consideraciones Recientes. San salvador, República del Salvador : Ministerio de Obras Públicas del Salvador. Unidad de Investigación y Desarrollo Vial 2001.

RUIZ Aurelio. Panorámica Española de las Mezclas Bituminosas : Desarrollos recientes. Consideraciones de futuro. Centros de Estudios del Transporte del CEDEX.

GARNICA P; GÓMEZ J y SESMA J. A. Mecánica de Materiales para Pavimentos. Capítulo 5 deformaciones permanentes y fatiga en concretos asfálticos. Ciudad de México. México. 2002. p. 20-29

PADILLA R. Alejandro. Capítulo 3, Mezclas Asfálticas UPC. p. 62-63.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard Specification for Superparve Volumetric Mix Design. AASHTO Designation M 323-04. USA. 2005.

GARNICA. A. Paul, GÓMEZ. L. José A y DELGADO A. Horacio. Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio : historia del compactador giratorio. Sanfandila, México : Secretaría de Comunicaciones y Transporte., Instituto Mexicano del Transporte. 2003. p.3-7.

DAVILA M. Juan Manuel. Análisis comparativo de modulo resiliente y ensayos de deformación permanente en mezclas asfálticas del tipo MDC-2 en briquetas compactadas con martillo Marshall y compactador giratorio : deformación permanente. Pontificia Universidad Javeriana, facultad de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.2005. p.23-30.



INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo. Colombia. 2007.

WITCZAK. M. W. Fundamentals of Asphalt Mix Design Manizales, Colombia : XVI Colombian symposium on engineering of pavements, September 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave. Publicación No FHW A-SA-95-003. February 1995.

RODRIGUEZ D. Jorge A. Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas. San salvador, República del Salvador : Ministerio de Obras Públicas del Salvador. Unidad de Investigación y Desarrollo Vial 2001.

THENOUX Z. Guillermo y CARRILLO O. Hector. Análisis de ahuellamiento en mezclas asfálticas Chilenas. Santiago de Chile, Chile : Centro de Ingeniería e Investigación Vial CIIV. Pontificia Universidad Católica de Chile.

GARNICA P. Anguas; DELGADO A. Horacio y SANDOVAL S. Carlos D. Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas : métodos de diseño de mezclas asfálticas y parámetros volumétricos. Sanfandila, México : Secretaría de Comunicaciones y Transporte., Instituto Mexicano del Transporte. 2005. p.1-14.

McGENNIS. Bob. Diseño de mezclas en caliente con aditivo de adherencia. Austin Texas, USA : South Central Superpave Center.