

Índice

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Abstract	vii
Índice	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xvii
Nomenclatura	xix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estructura de la tesis.....	3
Capítulo 2. Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Fisuración.....	5
2.3 Deformaciones permanentes.....	7
2.3.1 El rol del asfalto.....	9
2.3.2 Las cargas de tránsito.....	10
2.3.3 Factores que intervienen en desarrollo de deformaciones permanentes.....	12
2.3.3.1 Propiedades volumétricas de la mezcla.....	12
2.3.3.1.a Porcentaje de vacíos.....	12
2.3.3.1.b Vacíos del agregado mineral.....	13
2.3.3.1.c Porcentaje de asfalto.....	13
2.3.3.2 Granulometría de la mezcla.....	14
2.3.3.3 Efecto del agua, daño por humedad.....	16

3.4.2.2 Medición de ZSV - Ensayo de Creep.....	64
3.4.2.3 Barrido de deformaciones.....	65
3.4.2.4 Medición de la LSV – Ensayo de barrido de frecuencias.....	65
3.4.3 Medición de deformaciones permanentes sobre mezclas asfálticas.....	68
3.4.3.1 Compactación con compactador de placa.....	68
3.4.3.2 Ensayo de rueda cargada.....	70
3.5 Otras propiedades físicas y mecánicas de los asfaltos y de las mezclas.....	74
Capítulo 4. Estudio en los asfaltos de las propiedades reológicas vinculadas a las deformaciones permanentes.....	77
4.1 Introducción.....	77
4.2 Parámetro $G^*/\text{sen}\delta$	77
4.3 Medición de la ZSV y la LSV.....	82
4.4 Parámetro LSV.....	89
4.5 Comparación entre $G^*/\text{sen}\delta$ y la LSV.....	90
4.6 Conclusiones y comentarios sobre las propiedades reológicas de los asfaltos vinculadas a las deformaciones permanentes.....	94
Capítulo 5. Mediciones de ahuellamientos en el ensayo de rueda cargada. Caracterización mediante propiedades reológicas.....	97
5.1 Introducción.....	97
5.2 Deformaciones permanentes en mezclas y el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$	98
5.3 Deformaciones permanentes en mezclas y la medida de la LSV.....	101
5.4 Conclusiones y comentarios al capítulo.....	105
Capítulo 6. Efecto de la temperatura y el nivel de carga sobre el desarrollo del ahuellamiento en el ensayo de rueda cargada.....	107
6.1 Introducción.....	107
6.2 Efecto de la temperatura.....	108
6.2.1 Análisis de los resultados.....	108
6.2.2 Predicción del desempeño a partir de la LSV.....	118
6.2.3 Validación experimental.....	120
6.2.4 Conclusiones sobre el efecto de la temperatura.....	122
6.3 Efecto de las cargas sobre el desempeño frente al ahuellamiento.....	124
6.3.1 Resultados y discusión.....	124
6.3.2. Consideración de las sobrecargas dentro del diseño.....	128

6.3.3. Consideración de mayores volúmenes de tránsito dentro del diseño.....	130
6.3.4 Conclusiones sobre la influencia del nivel de carga.....	131
6.4. Relación entre propiedades reológicas, temperatura y cargas.....	132
6.4.1. Análisis de resultados.....	132
6.4.2. Consideraciones a la relación LSV-T-Carga.....	137
Capítulo 7. Conclusiones.....	139
7.1 Conclusiones de la tesis.....	139
7.2 Recomendaciones de estudios futuros.....	143
Capítulo 8. Referencias.....	145
Anexo I. Ensayos de barrido de frecuencias.....	151
Anexo II. Curvas de deformación-tiempo. Ensayos de rueda cargada.....	201

Índice de figuras

Figura 2.1. Tipos de fisuración en pavimentos asfálticos.....	6
Figura 2.2. Deformaciones permanentes.....	7
Figura 2.3. Tipos de ahuellamientos.....	8
Figura 2.4. Cambio en el comportamiento del asfalto en función de la temperatura.....	9
Figura 2.5. Acumulación de deformaciones permanentes en sucesivos veranos.....	10
Figura 2.6. Mezcla tipo microaglomerado.....	14
Figura 2.7. Granulometría mezcla densa fina.....	15
Figura 2.8. Granulometría mezcla densa gruesa.....	15
Figura 2.9. Huso granulométrico Superpave con zona restringida.....	16
Figura 2.10. Desprendimiento del ligante del agregado por efecto de la humedad.....	17
Figura 2.11. Efecto de la forma de agregado en el VAM.....	17
Figura 2.12. Equipo de ensayo para angularidad según norma AASTHO T304.....	19
Figura 2.13. Susceptibilidad térmica de tres asfaltos de igual grado. A y C: igual grado de penetración; B y C: igual grado por viscosidad a 60 °C.....	21
Figura 2.14. Mapa de temperaturas viales de Argentina para un 98 % de confiabilidad.....	25
Figura 2.15. Reómetro de corte (DSR) y comportamiento esfuerzo-deformación en un ensayo oscilatorio.....	27
Figura 2.16. Módulo dinámico (G^*) y ángulo de fase (δ) en función de la frecuencia de carga (izquierda) y en función de la temperatura (derecha).....	27
Figura 2.17. Importancia del δ en el trabajo disipado.....	29
Figura 2.18. Esquema de deformaciones en el tiempo durante un proceso de carga y descarga.....	30
Figura 2.19. Diagramas típicos de creep para asfaltos convencionales y modificados.....	31
Figura 2.20. Curva de viscosidad en función de la velocidad de carga.....	34
Figura 2.21. Viscosidad en función de la frecuencia.....	35
Figura 2.22. Viscosidad en función de la velocidad de corte para asfaltos convencionales y modificados.....	35

Figura 2.23. Modulo complejo G^* versus deformaciones.....	36
Figura 2.24. Modelo de Burger.....	38
Figura 2.25. Ensayo de creep incompleto.....	39
Figura 2.26. Comparación entre un ciclo de carga y descarga sobre un asfalto en el DSR y la acción del tránsito sobre la mezcla asfáltica.....	40
Figura 2.27. Deformaciones en el tiempo en ensayo de multicroep de varios asfaltos para el primer ciclo de carga.....	41
Figura 2.28. Deformaciones en el tiempo en ensayo de multicroep de varios asfaltos para el ciclo de carga N° 100.....	42
Figura 2.29. Deformaciones en el tiempo medidas en el MSCRT.....	43
Figura 2.30. Relación de la ZSV con $G^*/\text{sen}\delta$ de diferentes ligantes a diferentes temperaturas.....	44
Figura 2.31. Resultados de velocidad de deformación de testigos de pavimentos ensayados en el equipo de rueda cargada.....	47
Figura 3.1. Agregados utilizados.....	53
Figura 3.2. Fibras utilizadas en la SMA.....	53
Figura 3.3. Gradación de la mezcla densa (D-20).....	54
Figura 3.4. Gráficos del diseño Marshall de mezcla densa (D-20).....	55
Figura 3.5. Gradación del microaglomerado (M-10).....	56
Figura 3.6. Gradación de la SMA (SMA-10).....	58
Figura 3.7. Ensayo RTFOT. Recipientes de ensayo (Izquierda), Vista interior (Derecha).....	59
Figura 3.8. Equipo PAV. Vista general (Izquierda). Bandejas y bastidor (Derecha).....	60
Figura 3.9. Reómetro de Corte Dinámico (DSR).....	61
Figura 3.10. Vista del plato de carga con cabezales de calentamiento (izquierda). Diferentes accesorios del equipo (derecha).....	61
Figura 3.11. Detalle del plato de carga.....	62
Figura 3.12. Respuesta esfuerzo deformación.....	62
Figura 3.13. Modulo complejo (G^*) versus deformaciones.....	65
Figura 3.14. Resultado de un barrido de frecuencias en el DSR.....	66
Figura 3.15. Curva maestra generada por corrimientos de los barridos de frecuencias.....	67
Figura 3.16. Equipo compactador de placa.....	68
Figura 3.17. Molde para probetas de ensayo de rueda cargada.....	68
Figura 3.18. Detalle de la placa compactando.....	69

Figura 3.19. Equipo de rueda cargada. Vista general (izquierda); Detalle LVDT (derecha).....	70
Figura 3.20. Curva típica de deformaciones permanentes en función del tiempo obtenida en un ensayo de rueda cargada.....	71
Figura 3.21. Pesos de las diferentes configuraciones de carga.....	73
Figura 3.22. Detalle de las diferentes configuraciones de carga.....	73
Figura 4.1. $G^*/\text{sen}\delta$ vs T - $\omega_1 = 10$ rad/s. Asfaltos en estado original.....	80
Figura 4.2. $G^*/\text{sen}\delta$ vs T - $\omega_1 = 10$ rad/s. Asfaltos envejecidos en RTFOT.....	80
Figura 4.3. $G^*/\text{sen}\delta$ vs T - $\omega_2 = 0,6$ 1/s. Asfaltos en estado original.....	81
Figura 4.4. $G^*/\text{sen}\delta$ vs T - $\omega_2 = 0,6$ 1/s. Asfaltos envejecidos en RTFOT.....	82
Figura 4.5. G^* versus deformaciones. $f = 10$ Hz (arriba); $f = 1$ Hz (abajo).....	83
Figura 4.6. Análisis comparativo de los resultados de los ensayos de Creep y Barrido de frecuencias (BF). Izquierda: asfaltos convencionales; derecha: asfaltos modificados.....	85
Figura 4.7. Viscosidad en función de la frecuencia para las muestras del asfalto MP2.....	86
Figura 4.8. Viscosidad en función de la frecuencia para las muestras del asfalto C2.....	87
Figura 4.9. Viscosidad en función de la frecuencia para las muestras del asfalto C3.....	87
Figura 4.10. Detalle de dos muestras de asfalto MP2 luego de estar sometidas a diferentes tiempos en el ensayo de creep.....	88
Figura 4.11. LSV versus $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 10$ rad/s). Asfaltos en estado original.....	91
Figura 4.12. LSV versus $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 10$ rad/s). Asfaltos envejecidos.....	91
Figura 4.13. LSV versus $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 0,6$ rad/s). Asfaltos en estado original.....	93
Figura 4.14. LSV versus $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 0,6$ rad/s). Asfaltos envejecidos en RTFOT.....	94
Figura 5.1. V_d en función del $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 10$ rad/s) en asfalto original.....	99
Figura 5.2. V_d en función del $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 10$ rad/s) en asfalto envejecido.....	100
Figura 5.3. V_d en función del $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 0,6$ rad/s) en asfalto original.....	100
Figura 5.4. V_d en función del $G^*/\text{sen}\delta$ ($\omega = 0,6$ rad/s) en asfalto envejecido.....	101
Figura 5.5. V_d en función de la LSV en asfalto original.....	102
Figura 5.6. V_d en función de la LSV en asfalto envejecido.....	103
Figura 5.7. Relaciones V_d -LSV de los asfaltos en estado original.....	104
Figura 5.8. Relaciones V_d -LSV de los Asfaltos envejecidos en RTFOT.....	105
Figura 6.1. Varilla helicoidal dentro del recipiente de vidrio del RTFOT.....	110

Figura 6.2. Relación Vd-Temperatura con los distintos asfaltos de la mezcla D-20.....	111
Figura 6.3. Relación Vd-Temperatura con los distintos asfaltos de la mezcla M-10.....	111
Figura 6.4. Relación Vd-Temperatura con los distintos asfaltos de la mezcla SM A-10	112
Figura 6.5. Aspecto de diferentes muestras después del ensayo de rueda cargada. Mezcla M-10 C3 (Arriba), mezcla SMA-10 MP3 (Abajo).....	112
Figura 6.6. Vd de las mezclas D-20 en función de la LSV de los asfaltos.....	113
Figura 6.7. Vd de las mezclas M-10 en función de la LSV de los asfaltos.....	114
Figura 6.8. Vd de las mezclas SMA-10 en función de la LSV de los asfaltos.....	114
Figura 6.9. Vd versus LSV del asfalto para las diferentes mezclas.....	115
Figura 6.10. Vd versus LSV del asfalto envejecido.....	116
Figura 6.11. Variación de la LSV de los asfaltos en estado original en función de la temperatura.....	116
Figura 6.12. Variación de la LSV de los asfaltos envejecidos en función de la temperatura.....	117
Figura 6.13. Vd medidas en el ensayo de rueda cargada versus Vd estimadas para la mezcla D-20	121
Figura 6.14. Vd medidas en el ensayo de rueda cargada versus Vd estimadas, con la ecuación de ajuste para todas las mezclas	122
Figura 6.15: Comparación de curvas de deformación-tiempo de probetas ensayadas bajo diferentes niveles de carga.....	124
Figura 6.16. Fotos de probetas ensayadas bajo diferentes niveles de carga.....	125
Figura 6.17. Vd en función de la presión de contacto de las diferentes mezclas.....	126
Figura 6.18. Vd en función en la LSV para diferentes niveles de carga. Mezcla D-20	127
Figura 6.19. Vd en función en la LSV para diferentes niveles de carga. Mezcla M-10	127
Figura 6.20. Vd en función en la LSV para diferentes niveles de carga. Mezcla SMA-10.....	128
Figura 6.21. Vd del ensayo mezcla D-20 versus Vd estimadas. Izquierda: con la ecuación 6.2, derecha: con la ecuación 6.3.....	135
Figura 6.22. Vd del ensayo versus Vd estimadas (Izquierda: con la ecuación 6.2, derecha: con la ecuación 6.3). Arriba: mezcla M-10, abajo: mezcla SMA-10	136
Figura 6.23. LSV_i versus parámetro $LSV_{60\text{ }^\circ\text{C}}/(T/T_0)^{CT}$	137

Índice de tablas

Tabla 2.1. Temperaturas de los grados de performance.....	23
Tabla 2.2. ZSV correspondientes a $G^*/\text{sen}\delta$ de 1 y 2,2 kPa.....	44
Tabla 2.3. Diferentes equipos de rueda cargada.....	46
Tabla 3.1. Principales propiedades de los ligantes asfálticos estudiados.....	51
Tabla 3.1 (continuación). Principales propiedades de los ligantes asfálticos estudiados.....	52
Tabla 3.2. Principales propiedades de los agregados.....	53
Tabla 3.3. Composición granulométrica de la mezcla D-20.....	54
Tabla 3.4. Diseño Marshall para la mezcla D-20.....	55
Tabla 3.5. Composición granulométrica del microaglomerado M-10.....	56
Tabla 3.6. Propiedades del microaglomerado M-10.....	57
Tabla 3.7. Composición granulométrica de la SMA-10.....	57
Tabla 3.8. Propiedades de la SMA-10.....	58
Tabla 3.9. Restantes ensayos realizados sobre asfaltos, agregados y mezclas asfálticas.....	74
Tabla 3.9 (continuación). Restantes ensayos realizados sobre asfaltos, agregados y mezclas asfálticas.....	75
Tabla 4.1. Resultados de $G^*/\text{sen}\delta$ [Pa] a $\omega = 10$ rad/s.....	78
Tabla 4.2. Resultados de $G^*/\text{sen}\delta$ [Pa] a $\omega = 0,6$ rad/s.....	79
Tabla 4.3. Límites de deformación máxima.....	84
Tabla 4.4. Resultados de ensayo y análisis de varianza (ANOVA).....	84
Tabla 4.5. LSV de los asfaltos convencionales.....	89
Tabla 4.6. LSV de los asfaltos modificados.....	89
Tabla 4.7. Temperaturas de alta asociadas a la LSV y el $G^*/\text{sen}\delta$	92
Tabla 5.1. Resultados de $G^*/\text{sen}\delta$ y Vd a 60°C.....	98
Tabla 5.2. Resultados de LSV y Vd a 60°C.....	102
Tabla 5.3. Parámetros de ajuste por regresión no lineal – relación Vd-LSV.....	104
Tabla 6.1. Resultados de LSV de los asfaltos y Vd de las diferentes mezclas.....	109

Tabla 6.2. LSV del asfalto MP3 de diferentes procesos de envejecimiento en RTFOT y recuperado de mezcla.....	110
Tabla 6.3. Temperaturas de alta relacionadas a los conceptos de T_{500} y T_{2000}	117
Tabla 6.4. Coeficientes de ajuste de las mezclas estudiadas.....	119
Tabla 6.5. Resultados de ensayos y valores calculados (etapa de validación).....	121
Tabla 6.6. Vd [$\mu\text{m}/\text{min}$] de diferentes mezclas elaboradas con los asfaltos C3, M y MP3 bajo diferentes presiones de contacto.....	125
Tabla 6.7. Resultados de Vd de todas las mezclas estudiadas bajo diferentes temperaturas y presiones de contacto.....	129
Tabla 6.8. Aumentos en la T_{alta} del asfalto por mayores volúmenes de tránsito.....	131
Tabla 6.9. Resultados de Vd a diferentes temperaturas y cargas de las mezclas.....	133
Tabla 6.10. Coeficientes de ajuste a la ecuación 6.2 para las mezclas estudiadas.....	134
Tabla 6.11. Coeficientes de ajuste a la ecuación 6.3 para las mezclas.....	134

Nomenclatura

Abs: absorción [%].

D_{105} : deformación permanente en mezcla para 105 minutos [μm].

D_{120} : deformación permanente en mezcla para 120 minutos [μm].

DSR: Dinamic Shear Rheometer, reómetro de corte dinámico.

E: estabilidad Marshall [kN].

ESAL: equivalent single axle load, ejes equivalentes de carga simple.

e : altura del molde de rueda cargada [mm].

F: fluencia Marshall [mm].

f : frecuencia angular [Hz].

G^* , $|G^*|$: Modulo dinámico complejo del asfalto [kPa].

$G^*/\text{sen}\delta$: parámetro de deformaciones permanentes norma ASTM D 6373 [kPa].

h : espesor [mm].

H: profundidad en el pavimento desde la superficie [mm].

IP: índice de penetración.

$J_d \Psi(t)$: Compliance viscoelastico [1/Pa, 1/kPa].

J_{final} : compliance al final del ensayo [1/kPa].

$J_{\text{final-15}}$: compliance 15 minutos previos al fin del ensayo [1/kPa].

J_o : Compliance elastico [1/Pa, 1/kPa].

J_v : compliance viscoso [1/Pa, 1/kPa].

J_v : creep compliance [1/Pa, 1/kPa].

LA: Desgaste Los Angeles [%].

Lat: Latitud geográfica [°].

L : largo del molde de rueda cargada [mm].

l : ancho del molde de rueda cargada [mm].

LSV: Low Shear Viscosity, viscosidad a baja velocidad de corte [Pa.s].

M: masa de mezcla [kg].

P: presión de inflado del neumático [Kg/cm^2].

PAV: Pressure Aging Vessel, ensayo de envejecimiento en vasija a presión.

Pe: peso específico [gr/cm^3].

PG: Performance Grade. Grado de desempeño del ligante asfáltico.

r: factor de destrucción.

R: radio del área de contacto del neumático con el pavimento [cm].

r : radio del plato de ensayo del DSR [mm].

RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test, ensayo de envejecimiento de película fina rotativa.

RTI: resistencia a tracción indirecta [kPa].

SMA: Stone mastic asphalt.

t: tiempo [s, min].

T_{alta} : temperatura del pavimento a altas temperaturas del aire [$^{\circ}\text{C}$].

T_{baja} : temperatura del pavimento a bajas temperaturas del aire [$^{\circ}\text{C}$].

t_{creep} : tiempo de aplicación de carga en el ensayo de creep [s].

T_{max} : torque máximo aplicado.

v, v : porcentaje de vacíos [%].

VAM: vacíos del agregado mineral [%].

Vd: velocidad de deformación, ensayo rueda cargada [$\mu\text{m}/\text{min}$, mm/min].

Vd₆₀: velocidad de deformación a 60 min. de ensayo [$\mu\text{m}/\text{min}$, mm/min].

Vd₁₂₀: velocidad de deformación para 120 min. de ensayo [$\mu\text{m}/\text{min}$, mm/min].

W: carga de referencia aplicada al pavimento [kg].

W_{disp} : trabajo disipado en el pavimento por ciclo de carga.

W_i : carga cualquiera aplicada [kg].

ZSV: zero shear viscosity (Viscosidad de corte cero) [Pa.s].

$\Psi(t)$: función de memoria del asfalto.

θ : ángulo de rotación [rad].

ρ_{max} : densidad máxima teórica de la mezcla [kg/m^3].

δ : ángulo de fase [$^{\circ}$].

ϵ_p : deformación permanente en la mezcla asfáltica [mm].

γ : deformación específica [-].

$\dot{\gamma}$: velocidad de corte [rad/s].

γ_{max} : Deformación específica máxima [-].

η^* : viscosidad compleja [Pa.s].

η' : componente viscosa de la viscosidad compleja (también denominada real) [Pa.s].

η'' : componente elástica de la viscosidad compleja [Pa.s].

η_∞ : viscosidad a velocidad de corte infinita [Pa.s].

η_0 : viscosidad de corte cero [Pa.s].

σ : desviación estándar.

σ_{aire} : desviación estándar de las mediciones de temperatura del aire.

τ : tensión de corte aplicada [Pa].

τ_{max} : tensión de corte máxima [Pa].

τ_0 : tensión de corte constante [Pa].

ω : frecuencia angular [rad/s].

