



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

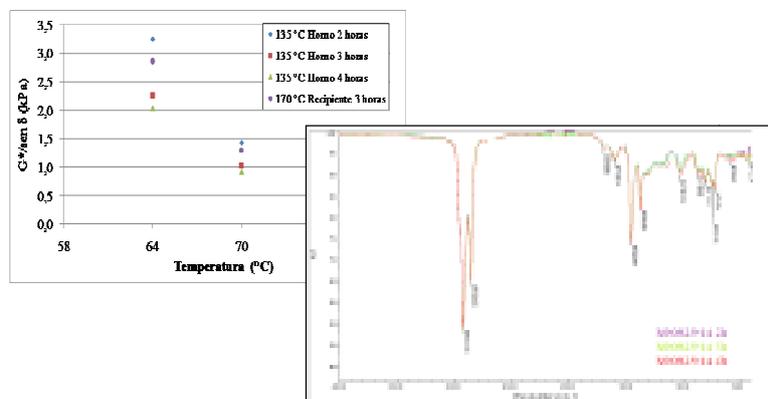
Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe Final: LM-PI-UMP-056-R4

DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE CALENTAMIENTO EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos



San José, Costa Rica
Febrero 2017

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



Información técnica del documento



1. Informe LM-PI-UMP-056-R4		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Determinación del efecto de la temperatura y el tiempo de calentamiento en las características del asfalto		4. Fecha del Informe Febrero, 2017
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <i>Para el almacenamiento y manipulación del asfalto es necesario exponerlo a temperaturas elevadas, adicionalmente la modificación del asfalto requiere temperaturas y tiempos de calentamiento aún mayores. La aplicación de altas temperaturas por tiempos extendidos se relaciona con el envejecimiento y la oxidación.</i> <i>Se sometieron muestras de asfalto a 135 °C, 150 °C y 165 °C durante dos, tres y cuatro horas en un horno de convección forzada para replicar las condiciones en las que se manipula y almacena el asfalto. Para simular las condiciones de modificación se utiliza como base la experiencia adquirida y las recomendaciones del fabricante de polímeros, por lo que se preparan en el recipiente de mezclado muestras calentadas a 170 °C durante tres horas, a 180 °C durante tres horas y media y a 190 °C durante 5 horas.</i> <i>En este estudio se utiliza el FTIR para demostrar que la exposición a altas temperaturas durante largos y diversos periodos no corresponde al factor principal que promueve la formación de los grupos funcionales de sulfóxidos y carbonilos asociados con la oxidación. Estos compuestos se producen por la exposición adicional al aire y a la presión, que se utiliza en los ensayos de la metodología Superpave para simular las condiciones de fabricación, colocación en campo y operación del asfalto en el pavimento, tal como lo demuestran los espectros infrarrojos de las muestras en estudio.</i> <i>Para determinar el efecto en el desempeño de la temperatura y los periodos de calentamiento en el desempeño se utilizan los parámetros reológicos de la metodología Superpave. Con las mediciones realizadas se logra demostrar que el envejecimiento provocado por la exposición a altas temperaturas, no tienen un efecto tan nocivo como se espera en los parámetros de desempeño del asfalto acondicionado a las diversas temperaturas. De hecho, los resultados obtenidos no permiten establecer una correlación directa entre temperatura, tiempo y susceptibilidad a la deformación y susceptibilidad a la fatiga. No obstante, para la muestra calentada a 190 °C en el recipiente de mezclado durante 5 horas si se obtienen los resultados esperados de baja susceptibilidad a la deformación y alta susceptibilidad a la fatiga. Consecuentemente, también demuestra buen soporte a altas cargas de tránsito, según los parámetros de MSCR.</i>		
10. Palabras clave Asfalto, Envejecimiento, FTIR, MSCR, Oxidación, PAV, RIFO	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 99
13. Preparado por:		
Ing. Elías Rodríguez Castro Investigadora Fecha: 13/02/2017	Quím. Jorge Salazar Delgado Investigador Fecha: 13/02/17	Téc. Esp. Cindy Zúñiga Araya Investigadora Fecha: 13/02/2017
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguirre Moza, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos Fecha: 13/2/17		15. Aprobado por: Ing. Guillermo Lora Salazar, Ph. D. Coordinador General PITRA Fecha: 13/02/17.



TABLA DE CONTENIDO

1. MARCO CONCEPTUAL	14
1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3 MARCO TEÓRICO	15
1.4 HIPÓTESIS	18
2. MÉTODO Y RESULTADOS	18
2.1 VARIABLES DE INTERÉS	19
2.2 POBLACIÓN-MUESTRA	20
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
2.3.1 IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS RELACIONADOS CON LA OXIDACIÓN MEDIANTE FTIR 23	
2.3.2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN Y A LA FATIGA	58
2.3.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA RESISTENCIA A ESFUERZOS REPETITIVOS	83
2.4 CONCLUSIONES	90
2.5 RECOMENDACIONES.....	91
2.6 ESTUDIOS FUTUROS.....	92
3. BIBLIOGRAFÍA	92



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS	24
FIGURA 2. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 150 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS	24
FIGURA 3. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS	25
FIGURA 4. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA.....	26
FIGURA 5. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA	27
FIGURA 6. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA	28
FIGURA 7. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO A 170 °C, 180 °C Y 190 °C EN CONDICIÓN ORIGINAL	29
FIGURA 8. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO	30
FIGURA 9. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO Y EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA.....	31
FIGURA 10. HORNO ROTATORIO DE PELÍCULA DELGADA. LOS ESPECÍMENES SE COLOCAN EN POSICIÓN HORIZONTAL, LO CUAL ASEGURA QUE EN LA ROTACIÓN TODO EL ASFALTO ESTÉ EXPUESTO A LAS CONDICIONES DE AIRE Y TEMPERATURA. (B) RECIPIENTE DE MUESTRA	32
FIGURA 11. RECIPIENTE DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN. LOS ESPECÍMENES SE TRASVASAN A LOS PLATOS Y SE INTRODUCEN AL EQUIPO EN EL DISPOSITIVO QUE SE MUESTRA EN (B).....	33
FIGURA 12. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C A 2 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV	34



FIGURA 13. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C A 3 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 34

FIGURA 14. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRA CALENTADA EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C A 4 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 35

FIGURA 15. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 150 °C A 2 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 35

FIGURA 16. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 150 °C A 3 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 36

FIGURA 17. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 150 °C A 4 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 36

FIGURA 18. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 165 °C A 2 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 37

FIGURA 19. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 165 °C A 3 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 37

FIGURA 20. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 165 °C A 4 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV 38

FIGURA 21. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DESPUÉS DEL RTFO 39

FIGURA 22. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DESPUÉS DEL RTFO + PAV 40

FIGURA 23. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN



FORZADA PARA LAS MUESTRAS ORIGINALES, DESPUÉS DEL RTFO Y DESPUÉS DEL RTFO + PAV..... 40

FIGURA 24. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA PARA LAS MUESTRAS ORIGINALES, DESPUÉS DEL RTFO Y DESPUÉS DEL RTFO + PAV..... 41

FIGURA 25. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LA MUESTRA CALENTADA EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO A 170 °C 3 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL RTFO + PAV 42

FIGURA 26. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LA MUESTRA CALENTADA EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO A 180 °C 3:30 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV. 42

FIGURA 27. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LA MUESTRA CALENTADA EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO A 190 °C 5 HORAS, ACONDICIONADO EN EL RTFO Y ACONDICIONADO EN EL PAV..... 43

FIGURA 28. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO PARA LAS MUESTRAS ORIGINALES, DESPUÉS DEL RTFO Y DESPUÉS DEL RTFO + PAV .. 44

FIGURA 29. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO PARA LAS MUESTRAS ORIGINALES, DESPUÉS DEL RTFO Y DESPUÉS DEL RTFO + PAV .. 44

FIGURA 30. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADAS EN EL RTFO 45

FIGURA 31. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 150 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADAS EN EL RTFO 45

FIGURA 32. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADAS EN EL RTFO 46



FIGURA 33. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADAS EN EL RTFO + PAV 47

FIGURA 34. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 150 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADAS EN EL RTFO + PAV 47

FIGURA 35. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADAS EN EL RTFO + PAV 48

FIGURA 36. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C, 150 °C Y 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS EN CONDICIÓN ORIGINAL 49

FIGURA 37. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C, 150 °C Y 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADO EN RTFO..... 49

FIGURA 38. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C, 150 °C Y 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS ACONDICIONADO EN RTFO + PAV 50

FIGURA 39. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO A 170 °C, 180 °C Y 190 °C ACONDICIONADAS EN RTFO 51

FIGURA 40. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL EN EL RECIPIENTE DE 51

FIGURA 41. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS ORIGINALES CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C, 150 °C Y 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS Y EN EL RECIPIENTE DE 52

FIGURA 42. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C, 150 °C Y 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS Y EN EL RECIPIENTE DE 53

FIGURA 43. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA A 135 °C, 150 °C Y 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS Y EN EL RECIPIENTE DE 53



FIGURA 44. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE SULFÓXIDOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA Y EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO PARA LAS MUESTRAS ORIGINALES, DESPUÉS DEL RTFO Y DESPUÉS DEL RTFO + PAV 55

FIGURA 45. COMPARACIÓN DE LAS ÁREAS DE LAS SEÑALES DE CARBONILOS OBTENIDOS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE ACONDICIONAMIENTO EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA Y EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO PARA LAS MUESTRAS ORIGINALES, DESPUÉS DEL RTFO Y DESPUÉS DEL RTFO + PAV 55

FIGURA 46. COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS ÁREAS DE LA SEÑAL DE SULFÓXIDOS PARA LOS DIFERENTES ACONDICIONAMIENTOS 57

FIGURA 47. COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS ÁREAS DE LA SEÑAL DE CARBONILOS LOS DIFERENTES ACONDICIONAMIENTOS 58

FIGURA 48. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN DE TODAS LAS MUESTRAS ANTES DE LOS ACONDICIONAMIENTOS EN EL RTFO 60

FIGURA 49. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN DE TODAS LAS MUESTRAS ANTES DE LOS ACONDICIONAMIENTOS EN EL RTFO 61

FIGURA 50. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LA TEMPERATURA DE 135 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS 62

FIGURA 51. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LA TEMPERATURA DE 150 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS 62

FIGURA 52. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LA TEMPERATURA DE 165 °C A 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS 63

FIGURA 53. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS PREPARADAS EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO 63

FIGURA 54. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 2 HORAS A 135 °C, 150 °C Y 165 °C 64

FIGURA 55. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 3 HORAS A 135 °C, 150 °C Y 165 °C 64



FIGURA 56. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS
CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 4 HORAS A 135 °C,
150 °C Y 165 °C..... 65

FIGURA 57. MUESTRAS QUE REPORTAN LOS VALORES DE $G^*/\text{SENO}(\delta)$ MÁS BAJOS 66

FIGURA 58. MUESTRAS QUE REPORTAN LOS VALORES DE $G^*/\text{SENO}(\delta)$ MÁS ALTOS 66

FIGURA 59. RESULTADOS DEL PARÁMETRO DE LA DEFORMACIÓN PARA TODAS LAS MUESTRAS 69

FIGURA 60. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN DE TODAS LAS MUESTRAS
DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO 69

FIGURA 61. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LA TEMPERATURA DE 135
°C DURANTE 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL
RTFO 70

FIGURA 62. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LA TEMPERATURA DE 150
°C DURANTE 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL
RTFO 70

FIGURA 63. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LA TEMPERATURA DE 165
°C DURANTE 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL
RTFO 71

FIGURA 64. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS
PREPARADAS EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN
EL RTFO 71

FIGURA 65. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS
CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 2 HORAS A 135 °C,
150 °C Y 165 °C DESPUÉS DEL RTFO 72

FIGURA 66. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS
CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 3 HORAS A 135 °C,
150 °C Y 165 °C DESPUÉS DEL RTFO 73

FIGURA 67. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS
CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 4 HORAS A 135 °C,
150 °C Y 165 °C DESPUÉS DEL RTFO 73

FIGURA 68. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS QUE PRESENTAN MENOR SUSCEPTIBILIDAD A LA
DEFORMACIÓN DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO..... 74



FIGURA 69. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS QUE PRESENTAN MAYOR SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO..... 74

FIGURA 70. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE FATIGA DE TODAS LAS MUESTRAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV 77

FIGURA 71. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS QUE PRESENTAN MAYOR SUSCEPTIBILIDAD A LA FATIGA DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV..... 77

FIGURA 72. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE FATIGA PARA LA TEMPERATURA DE 135 °C DURANTE 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV..... 78

FIGURA 73. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE FATIGA PARA LA TEMPERATURA DE 150 °C DURANTE 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV..... 78

FIGURA 74. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE FATIGA PARA LA TEMPERATURA DE 165 °C DURANTE 2 HORAS, 3 HORAS Y 4 HORAS DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV..... 79

FIGURA 75. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE FATIGA PARA LAS MUESTRAS PREPARADAS EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV 79

FIGURA 76. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 2 HORAS A 135 °C, 150 °C Y 165 °C DESPUÉS DEL RTFO + PAV..... 80

FIGURA 77. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 3 HORAS A 135 °C, 150 °C Y 165 °C DESPUÉS DEL RTFO + PAV..... 81

FIGURA 78. COMPARACIÓN DEL PARÁMETRO DE DEFORMACIÓN PARA LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA DURANTE 4 HORAS A 135 °C, 150 °C Y 165 °C DESPUÉS DEL RTFO + PAV..... 81

FIGURA 79. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS QUE PRESENTAN MENOR SUSCEPTIBILIDAD A LA FATIGA DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV..... 82

FIGURA 80. COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS QUE PRESENTAN MAYOR SUSCEPTIBILIDAD A LA FATIGA DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO + PAV..... 83

FIGURA 81. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA OBTENIDOS DESPUÉS DE COMPLETAR LOS CICLOS A LOS ESFUERZOS DE 0,1 KPA Y 3,2 KPA..... 86



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

FIGURA 82. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE JNR OBTENIDOS DESPUÉS DE COMPLETAR LOS CICLOS A LOS ESFUERZOS DE 0,1 KPA Y 3,2 KPA	87
FIGURA 83. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS JNR DIFF Y R DIFF	88
FIGURA 84. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS JNR DIFF Y R DIFF	88



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN POR GRADO DE VISCOSIDAD AC-30	20
TABLA 2. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DEL ASFALTO ORIGINAL EVALUADO EN LA TEMPERATURA SUPERIOR DEL GRADO DE DESEMPEÑO	21
TABLA 3. MÓDULO DE DEFORMABILIDAD DEL ASFALTO ORIGINAL EVALUADO EN LA TEMPERATURA SUPERIOR DEL GRADO DE DESEMPEÑO DESPUÉS DE ACONDICIONAR EL ASFALTO EN EL HORNO ROTATORIO DE CAPA DELGADA (RTFO)	21
TABLA 4. MÓDULO DE FATIGA DEL ASFALTO ORIGINAL EVALUADO EN LA TEMPERATURA INTERMEDIA DEL GRADO DE DESEMPEÑO DESPUÉS DE ACONDICIONAR EL ASFALTO EN EL HORNO ROTATORIO DE CAPA DELGADA (RTFO) Y EN EL RECIPIENTE DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO (PAV)	21
TABLA 5. MÓDULO DE RIGIDEZ DEL ASFALTO ORIGINAL EVALUADO EN LA TEMPERATURA INFERIOR DEL GRADO DE DESEMPEÑO DESPUÉS DE ACONDICIONAR EL ASFALTO EN EL HORNO ROTATORIO DE CAPA DELGADA (RTFO) Y EN EL RECIPIENTE DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO (PAV)	22
TABLA 6. RECUPERACIÓN ELÁSTICA DEL ASFALTO A LOS ESFUERZOS MÚLTIPLES DE LA MUESTRA ACONDICIONADA EN EL RTFO	22
TABLA 7. RESUMEN DE CLASIFICACIÓN DE GRADO DE DESEMPEÑO DE LA MUESTRA	22
TABLA 8. ÁREA DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS PARA LAS MUESTRAS ASFALTO CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA	26
TABLA 9. ÁREA DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS PARA LAS MUESTRAS ASFALTO CALENTADAS EN EL RECIPIENTE DE MODIFICACIÓN	29
TABLA 10. ÁREA DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS PARA LAS MUESTRAS CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA Y EN EN EL RECIPIENTE DE MODIFICACIÓN.....	31
TABLA 11. ÁREA DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS PARA LA MUESTRA DE ASFALTO DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN RTFO Y PAV DE LAS MUESTRAS ASFALTO CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA.	38
TABLA 12. ÁREA DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS PARA LA MUESTRA DE ASFALTO DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN RTFO Y PAV DE LAS MUESTRAS ASFALTO CALENTADAS EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO	43
TABLA 13. ÁREA DE SULFÓXIDOS Y CARBONILOS PARA LA MUESTRA DE ASFALTO ORIGINAL, DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN RTFO Y DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO	



EN RTFO + PAV DE LAS MUESTRAS ASFALTO CALENTADAS EN EL HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA Y EN EL RECIPIENTE DE MEZCLADO	54
TABLA 14. COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS ÁREAS DE LA SEÑAL DE SULFÓXIDOS PARA LOS DIFERENTES ACONDICIONAMIENTOS	56
TABLA 15. COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS ÁREAS DE LA SEÑAL DE CARBONILOS PARA LOS DIFERENTES ACONDICIONAMIENTOS	57
TABLA 16. RESULTADOS DE MÓDULO COMPLEJO, ÁNGULO DE FASE Y PARÁMETRO RELACIONADO CON LA SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN ANTES DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO	59
TABLA 17. RESULTADOS DE MÓDULO COMPLEJO, ÁNGULO DE FASE Y PARÁMETRO RELACIONADO CON LA SUSCEPTIBILIDAD A LA DEFORMACIÓN DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO	67
TABLA 18. RESULTADOS DE MÓDULO COMPLEJO, ÁNGULO DE FASE Y PARÁMETRO RELACIONADO CON LA SUSCEPTIBILIDAD A LA FATIGA DESPUÉS DEL ACONDICIONAMIENTO EN EL RTFO Y EN EL PAV	75
TABLA 19. CLASIFICACIÓN DE ASFALTO SEGÚN LAS VARIABLES DEL ENSAYO MSCR	84
TABLA 20. RESULTADOS DEL ENSAYO DE MSCR A 64 °C	85
TABLA 21. RESUMEN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS REOLÓGICOS	89



1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 Introducción

El uso de asfalto modificado para incrementar la capacidad de soporte de los pavimentos asfálticos, no solo ha mejorado su desempeño, sino también ha cambiado las condiciones de producción.

La incorporación de los aditivos poliméricos que se utilizan para modificar al asfalto agregan complejidad a la mezcla de compuestos que es el asfalto. Esta incorporación, implica definir nuevos valores para las variables productivas que han sido constantes durante muchos años y que varían de acuerdo con el aditivo, además de incrementar la necesidad de estudios para entender los procesos químicos, físicos y mecánicos que se producen con la adición de los modificantes.

La modificación de asfalto implica, en muchos casos, que el material estará expuesto a temperaturas mayores de lo usual y durante periodos más extensos.

De acuerdo con la experiencia adquirida en el laboratorio y según las recomendaciones de los fabricantes de polímeros que han usado, el SBR (estireno-butadieno caucho, por sus siglas en inglés) genera buenos resultados cuando se mezcla a 170 °C durante 3 horas. Según el estudio “Optimización del tiempo y temperatura de modificación de asfalto con SBS” (Rodríguez-Castro, Salazar-Delgado, Zúñiga-Araya, & Aguiar-Moya, 2014) la mejor respuesta reológica del material se obtiene cuando se modifica con SBS (estireno-butadieno-estireno, por sus siglas en inglés) durante 3:30 h a 180 °C y finalmente para el EVA (etilvinilacetato) por recomendaciones del interesado en el uso del producto se ha modificado a 190 °C durante 5 horas con la adición de PPA (ácido polifosfórico, por sus siglas en inglés) realizado.

Hay que considerar adicionalmente, que los asfaltos modificados aumentan la viscosidad, por lo que es probable que se requieran temperaturas mayores de bombeo desde el tanque de almacenamiento de asfalto hasta la planta de mezclado, por lo que se evalúa la respuesta del asfalto a temperaturas mayores a 135 °C.

Este estudio que tiene el objetivo práctico de demostrar que la temperatura de modificación y de almacenamiento no es el factor principal de la oxidación.



1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Determinar la incidencia del tiempo de exposición de la temperatura en la oxidación del asfalto mediante análisis reológico y químico del asfalto sometido a altas temperaturas.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos planteados para este proyecto se listan a continuación:

1. Caracterizar el asfalto mediante la clasificación de grado de desempeño. Además de conocer propiedades químicas utilizando espectroscopia infrarroja.
2. Determinar el efecto de la temperatura en las propiedades reológicas y en la composición química del asfalto al ser sometido a 135 °C, 150 °C y 165 °C durante dos, tres y cuatro horas en un horno de convección forzada.
3. Determinar el efecto de la temperatura en las propiedades reológicas y en la composición química del asfalto al ser sometido a durante tres horas a 170 °C en un recipiente de modificación de asfalto con agitación constante.
4. Determinar el efecto de la temperatura en las propiedades reológicas y en la composición química del asfalto al ser sometido a durante tres horas y media a 180 °C en un recipiente de modificación de asfalto con agitación constante.
5. Determinar el efecto de la temperatura en las propiedades reológicas y en la composición química del asfalto al ser sometido a durante cinco a 190 °C en un recipiente de modificación de asfalto con agitación constante.
6. Comparar los resultados obtenidos con los diferentes métodos.

1.3 Marco Teórico

El asfalto es una mezcla compleja de polímeros y moléculas de alto peso molecular, que incluso contienen heteroátomos de nitrógeno, oxígeno y azufre y trazas de metales como vanadio y níquel. (Petersen & Harnsberger, 1998). Desde hace mucho tiempo se reconoce que la composición del asfalto también varía con su fuente y que esto también influye la susceptibilidad al endurecimiento por envejecimiento (Thenoux g. , 1987).



El asfalto es un material termoplástico que se suaviza al incrementar la temperatura y se endurece al reducirla, pero también es viscoelástico, es decir presenta características mecánicas de flujo y de deformación elástica, en ciertos rangos de temperatura. (Kanabar, 2010).

Los polímeros termoplásticos tienen naturaleza amorfa o semicristalina. Las cadenas macromoleculares no tienen un orden específico, unidas por fuerzas de tipo Van der Waals, que son lo suficientemente débiles como para que desaparezcan por acción de la temperatura al aumentar los movimientos moleculares. Conforme aumenta la temperatura las moléculas se deslizan unas sobre otras y el material fluye. (Martín-Alfonso, 2013)

El modelo que desarrolló Strategic Highway Research Program (SHRP, por sus siglas en inglés) considera al asfalto como una mezcla de moléculas polares y no polares que forman enlaces débiles que se rompen o se crean en función de la temperatura y de esfuerzos físicos. Las moléculas polares interactúan y le confieren al asfalto propiedades elásticas y las moléculas no-polares contribuyen al comportamiento viscoso del asfalto y controlan sus propiedades a temperaturas bajas (Petersen, y otros, 1994).

El modelo coloidal que fue desarrollado desde los años 20, propone que los asfaltenos constituidos por poli-ciclo aromáticos de alto peso molecular y de alta polaridad, están dispersos en los maltenos, que es una mezcla de compuestos aceitosos. Este modelo propone que los asfaltenos se dispersan mejor cuando la cantidad de aromáticos en los maltenos es mayor (Vargas-Arenas, 2004).

A temperaturas suficientemente altas el asfalto presenta un comportamiento Newtoniano descrito por su viscosidad. Las partículas de soluto se difunden libremente cuando el asfalto es sometido a un esfuerzo y se presenta una competencia entre el movimiento Browniano y fuerzas hidrodinámicas. A temperaturas inferiores a 60°C, el movimiento de las partículas de soluto es inducido solamente por el esfuerzo aplicado y la contribución del comportamiento Browniano desaparece, pero además a tiempos de carga cortos, el comportamiento viscoelástico del material no se puede despreciar pues la reología del asfalto se separa en dos regiones, una corresponde a la aparición de la viscoelasticidad y la otra a la vitrificación. (Vargas, Afanasjeva, Álvarez, & Marchal, 2008)

Esta complejidad de composición y de comportamiento hace que los procesos de envejecimiento sean más complejos de comprender y explicar, ya que el envejecimiento en cualquier material, es

Informe LM-PI-UMP-056-R4	Fecha de emisión: Febrero 2017	Página 16 de 95
--------------------------	--------------------------------	-----------------



un conjunto de procesos químicos y físicos simultáneos que sufren todos los materiales y que afecta sus propiedades de manera irreversible (Kanngiesser, 2015).

El estudio de los procesos de envejecimiento en el asfalto es muy antiguo y considera la complejidad de la composición del asfalto. En general se ha determinado que existen tres etapas fundamentales en el proceso, a saber, la pérdida de componentes aceitosos, los cambios en la composición química como resultado de la reacción con el oxígeno y los efectos tixotrópicos históricos producidos por estructuración molecular. (Chávez-Valencia & Hernández-Barriga, 2009)

El envejecimiento físico, generalmente ocurre antes de alcanzar la temperatura de transición vítrea, donde las macromoléculas modifican su posición para alcanzar el equilibrio en el estado de volumen libre. (Hastie, 1991). Sin embargo, los mecanismos que se han desarrollado para polímeros amorfos no se aplican completamente al asfalto, pues se observa endurecimiento del material bituminoso a temperaturas superiores a la temperatura vítrea. (Anderson, David; Marasteanu, Mihai, 1999)

Adicionalmente, cuando los polímeros amorfos tienen largas cadenas moleculares y temperatura de transición vítrea superior a la temperatura ambiente, los cambios físicos pueden también ser resultados de largos periodos de almacenamiento a temperatura ambiente (Gilbert, 2016), lo cual también ha sido evidenciado en el asfalto.

El envejecimiento químico implica procesos de degradación térmica, fotooxidación, oxidación, entre otros (Cañadas-Lorenzo, 1999). Desde hace muchos años se clasificaron los factores de envejecimiento como intrínseco y extrínseco, con respecto al bitumen. Los primeros se refieren a la oxidación, la volatilización, la tixotropía y la sinéresis, propios del sistema coloidal del asfalto. Dentro de los extrínsecos se encuentran las condiciones ambientales, pero también aspectos relacionados con el diseño de la mezcla como el espesor de la película de ligante, el porcentaje de vacíos de la mezcla, la acción físico-química de los agregados y las cargas de tránsito (De Luca, 1978).

Además, (Petersen J. , 1984) determinó que existen tres factores fundamentales que causan el envejecimiento del asfalto en las mezclas: la pérdida de componentes aceitosos, por volatilización o por absorción de áridos porosos; los cambios en la composición química causados por reacción



con el oxígeno atmosférico; y los efectos tixotrópicos históricos producidos por estructuración molecular.

Cuando se incluye el oxígeno dentro de la matriz asfáltica se produce uno de los procesos que han sido analizados más profundamente en los últimos años como una de las principales causas del deterioro del pavimento asfáltico. En esta línea, se han establecido dos fases o periodos de oxidación, a corto plazo y a largo plazo. La primera ocurre en la etapa fabricación de la mezcla asfáltica y en la primera etapa del proceso constructivo. Principalmente sucede envejecimiento térmico y se dan las primeras reacciones de oxidación. El envejecimiento a largo plazo es producto de factores ambientales como temperatura, humedad, oxígeno y radiación. (Al-Rub, darabi, Kim, Litte, & Glover, 2013)

Es claro que el envejecimiento del asfalto es un proceso complejo que tiene etapas que pueden diferenciarse, pero no aislarse y que no es solamente función de la temperatura.

1.4 Hipótesis

La temperatura de calentamiento que se utiliza para preparar las muestras de asfalto modificado no incide significativamente en las características de desempeño ni acelera la oxidación del asfalto.

2. MÉTODO Y RESULTADOS

Se analiza una muestra de asfalto de uso general en Costa Rica clasificado por Grado de Viscosidad como AC-30. El asfalto además es caracterizado mediante la clasificación de Grado de Desempeño.

Al analizar muestras de asfalto es necesario fluidificarlas para poder verterlas en los distintos recipientes de ensayo, para lo cual es necesario calentarlas. Generalmente se requiere de 2 o 3 horas a 135 °C en un horno de convección forzada si se encuentra en un recipiente metálico o de vidrio con una capacidad de 3,8 L o menores. Sin embargo, si es un asfalto modificado, se requieren de temperaturas y tiempos mayores. Por este motivo se seleccionan como temperaturas de comparación 135 °C, 150 °C y 165 °C durante 2, 3 y 4 horas cada una.

Adicionalmente, los procesos de modificación requieren que el asfalto se mezcle con el modificante a temperaturas aún superiores durante periodos que dependen del modificante. Los

Informe LM-PI-UMP-056-R4	Fecha de emisión: Febrero 2017	Página 18 de 95
--------------------------	--------------------------------	-----------------



modificantes más conocidos y que han sido utilizados en el laboratorio son los látex estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés), estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés), las resinas de copolímero de etileno y polímeros comerciales tipo RET de Surfax-Dupont.

De acuerdo con la información del fabricante y por los resultados obtenidos en Informe LM-PI-UMP-035 “Optimización del tiempo y temperatura de modificación de asfalto con SBS” (Rodríguez-Castro, Salazar-Delgado, Zúñiga-Araya, & Aguiar-Moya, 2014), se determinan las temperaturas y periodos de calentamiento.

Considerando lo anterior se seleccionan las temperaturas de 170°C, 180 °C y 190 °C con periodos de calentamiento de 3 horas, 3:30 horas y 5 horas, respectivamente.

Además de la exposición del asfalto a las temperaturas mencionadas, se analiza el efecto que la exposición a las temperaturas mencionadas tiene sobre el asfalto que se somete a los acondicionamientos posteriores: simulan los procesos de mezclado y compactación (mediante el RTFO) y la operación en carretera durante 10 años (RTFO + PAV).

Por tanto cada muestra se analizará en tres condiciones: la que se denominará como original después del calentamiento especificado, la muestra después del acondicionamiento en RTFO y la muestra después del acondicionamiento en RTFO + PAV.

2.1 Variables de Interés

Todos los ensayos se realizarán a cada uno de las muestras en las tres condiciones mencionadas, excepto aquellas pruebas específicas que se efectúan después de un acondicionamiento determinado.

Es importante determinar el efecto de la temperatura en la oxidación y en el desempeño. Para medir la oxidación se evalúa la formación sulfóxidos y carbonilos mediante la comparación de las áreas de los espectros que se obtienen mediante la técnica de FTIR.

El desempeño del asfalto se mide a través de las variables reológicas que determinan la clasificación de Grado de Desempeño, que corresponden a los módulos que se relacionan con la respuesta del asfalto a las cargas y el ángulo de fase.

Se analiza la respuesta de cada muestra a cargas repetidas que se relaciona con la capacidad del asfalto para soportar el tránsito a la temperatura del proyecto, que en nuestro caso se define como 64 °C. (Elizondo-Arrieta, Aguiar-Moya, Rodríguez-Castro, & Loría-Salazar, 2012)

Informe LM-PI-UMP-056-R4	Fecha de emisión: Febrero 2017	Página 19 de 95
--------------------------	--------------------------------	-----------------



2.2 Población-Muestra

Se usa un ligante asfáltico base, clasificado según la normativa nacional vigente como AC-30, acondicionado a diferentes temperaturas y periodos

2.3 Resultados y Discusión

A continuación se detallan las características de acuerdo con dos tipos de clasificación, una conocida como Grado de Viscosidad (ASTM D 3381) (Ver Tabla 1) y la segunda es mediante Grado de Desempeño (AASHTO M 320) (Ver Tabla 7).

Según la clasificación por Grado de Viscosidad el asfalto utilizado es un AC-30

Tabla 1. Parámetros para la clasificación por Grado de Viscosidad AC-30

Ensayo	Resultados	Unidades	Especif.
Densidad a 25 °C	1,027 ± 0,001	g/cm ³	-
Gravedad específica	1,030 ± 0,001		
Penetración a 25 °C	50 ± 1	1/10 mm	mín 50
Punto de inflamación	337 ± 11	°C	mín 232
Solubilidad en Tricloroetileno	99,94 ± 0,05	%	mín 99,0
Viscosidad absoluta a 60 °C	3359 ± 71	P	2400-3600
Viscosidad cinemática a 135 °C	512 ± 1	cSt	mín 350
Cambio de masa en el TFO	0,056 ± 0,003	%	max 1,0
Ductilidad a 25°C postpérdida	100,0 ± 0,2	cm	mín 40
Viscosidad absoluta a 60 °C postpérdida	7782 ± 150	P	máx 15000

La clasificación por Grado de Desempeño (AASHTO M 320), es más compleja que la clasificación por Grado de Viscosidad, pues evalúa la respuesta reológica de la muestra a distintas temperaturas para determinar el comportamiento del asfalto a las diferentes temperaturas que la mezcla asfáltica y el pavimento están expuestos durante su vida útil. A continuación, se detalla la respuesta de la muestra a distintas temperaturas.



Tabla 2. Módulo de deformabilidad del asfalto original evaluado en la temperatura superior del grado de desempeño

Ensayo	Resultados	Unidades	Límite Superior
Módulo de deformabilidad ($G^* / \text{sen } \delta$) 64 °C	2,02	kPa	64
Módulo de deformabilidad ($G^* / \text{sen } \delta$) 70 °C	0,93	kPa	
Módulo de deformabilidad ($G^* / \text{sen } \delta$) 76 °C	0,46	kPa	
Angulo de fase (δ) 64 °C	85,87	°	
Angulo de fase (δ) 70 °C	87,15	°	
Angulo de fase (δ) 76 °C	89,41	°	

Tabla 3. Módulo de deformabilidad del asfalto original evaluado en la temperatura superior del grado de desempeño después de acondicionar el asfalto en el horno rotatorio de capa delgada (RTFO)

Ensayo	Resultados	Unidades	Límite Superior
Módulo de deformabilidad ($G^* / \text{sen } \delta$) 64 °C	4,28	kPa	64
Módulo de deformabilidad ($G^* / \text{sen } \delta$) 70 °C	1,90	kPa	
Módulo de deformabilidad ($G^* / \text{sen } \delta$) 76 °C	0,98	kPa	
Angulo de fase (δ) 64 °C	82,57	°	
Angulo de fase (δ) 70 °C	84,51	°	
Angulo de fase (δ) 76 °C	86,20	°	

Tabla 4. Módulo de fatiga del asfalto original evaluado en la temperatura intermedia del grado de desempeño después de acondicionar el asfalto en el horno rotatorio de capa delgada (RTFO) y en el recipiente de envejecimiento acelerado (PAV)

Ensayo	Resultados	Unidades	Temperatura Intermedia
Módulo de fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) 22 °C	5,19	MPa	25
Módulo de fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) 25 °C	3,69	MPa	
Módulo de fatiga ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) 28 °C	2,56	MPa	
Angulo de fase (δ) 22 °C	43,78	°	
Angulo de fase (δ) 25 °C	46,19	°	
Angulo de fase (δ) 28 °C	48,70	°	



Tabla 5. Módulo de rigidez del asfalto original evaluado en la temperatura inferior del grado de desempeño después de acondicionar el asfalto en el horno rotatorio de capa delgada (RTFO) y en el recipiente de envejecimiento acelerado (PAV)

Ensayo	Resultados	Unidades	Límite Inferior
Módulo de rigidez (s) -16 °C	60,09	MPa	-22
Módulo de rigidez (s) -22 °C	118,53	MPa	
Módulo de rigidez (s) -28 °C	241,44	MPa	
Valor m estimado (m) -16 °C	0,417		
Valor m estimado (m) -22 °C	0,352		
Valor m estimado (m) -28 °C	0,296		

Como complemento a lo anterior, la clasificación por Grado de Desempeño evalúa la respuesta del asfalto o a las cargas repetidas para determinar el tipo de tránsito que es capaz de soportar durante la operación. Esta clasificación se conoce como Grado de Desempeño Plus (AASHTO M 332) y se realiza a la temperatura del proyecto, que como se mencionó anteriormente se tomará como 64 °C.

Tabla 6. Recuperación elástica del asfalto a los esfuerzos múltiples de la muestra acondicionada en el RTFO

Ítem	Resultados	Unidades
Promedio de porcentaje de recuperación a 0,1 kPa	5,6	%
Promedio de porcentaje de recuperación a 3,2 kPa	2	%
Diferencia entre promedio de porcentaje de recuperación a 0,1 kPa y 3,2 kPa	64,7	%
Jnr a 0,1 kPa	2	%
Jnr a 3,2 kPa	2,2	%
Diferencia en Jnr entre 0,1 kPa y 3,2 kPa	10,7	%

De acuerdo con los resultados anteriores la clasificación por Grado de Desempeño indica que el asfalto no se deformará cuando la temperatura del pavimento alcance 64 °C y no se agrietará si la temperatura llega a 25 °C y que puede soportar tránsito estándar (según con los valores determinados en la clasificación), que corresponde a menos de 3 millones de ejes equivalentes.

Tabla 7. Resumen de Clasificación de Grado de Desempeño de la muestra

PG: 64-(25)-22	
Temperatura Superior (°C)	64
Temperatura Inferior (°C)	-22
Temperatura Intermedia (°C)	25
Clasificación según resultados del MSCR a 64 °C	S



Esta información es la que se utilizará como base para medir el efecto de los distintos acondicionamientos térmicos a los que se sometió el asfalto.

2.3.1 Identificación de compuestos relacionados con la oxidación mediante FTIR

La espectroscopía infrarroja se utiliza para el estudio de grupos funcionales en distintos materiales, desde hace algún tiempo se ha utilizado en el asfalto para identificar los cambios que se producen por distintas razones y que afectan el desempeño del asfalto.

En el caso de estudio, se analiza la presencia de sulfóxidos y de carbonilos tanto en el asfalto original, como en el expuesto a los diferentes calentamientos y acondicionamientos. Estos grupos funcionales se relacionan con la oxidación del asfalto.

Para la medición se utiliza el equipo Nicolet iS50 en modo de reflectancia total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés) de Thermo Fischer Scientific y los espectros se obtienen con el software Omnic.

El objetivo es comparar el área de las bandas de absorción de los para determinar cuál calentamiento o acondicionamiento incrementa la presencia de los grupos funcionales mencionados, que se relacionan con la oxidación. Los sulfóxidos se ubican cerca de los 1050 cm^{-1} y los carbonilos cerca de 1700 cm^{-1} . En las figuras siguientes se observan los resultados de los espectros infrarrojos.

Para determinar si existe oxidación significativa entre los espectros que se obtienen de cada una de las muestras acondicionadas se realiza una comparación cualitativa colocando los espectros uno sobre otro.

En la Figura 1 se comparan los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 2 horas, 3 horas y 4 horas. En las señales de carbonilos y sulfóxidos no se aprecia diferencia significativa entre los espectros de cada muestra.

Esta misma comparación se hace para las muestras calentadas a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 2 horas, 3 horas y 4 horas (Ver Figura 2) y a $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 2 horas, 3 horas y 4 horas (Ver Figura 3). El resultado es el mismo que el obtenido para la temperatura de $135\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Es importante notar que la señal que se detecta en los carbonilos es muy pequeña, en algunos casos incluso no se percibe señal, por lo que es incuantificable.

Informe LM-PI-UMP-056-R4	Fecha de emisión: Febrero 2017	Página 23 de 95
--------------------------	--------------------------------	-----------------

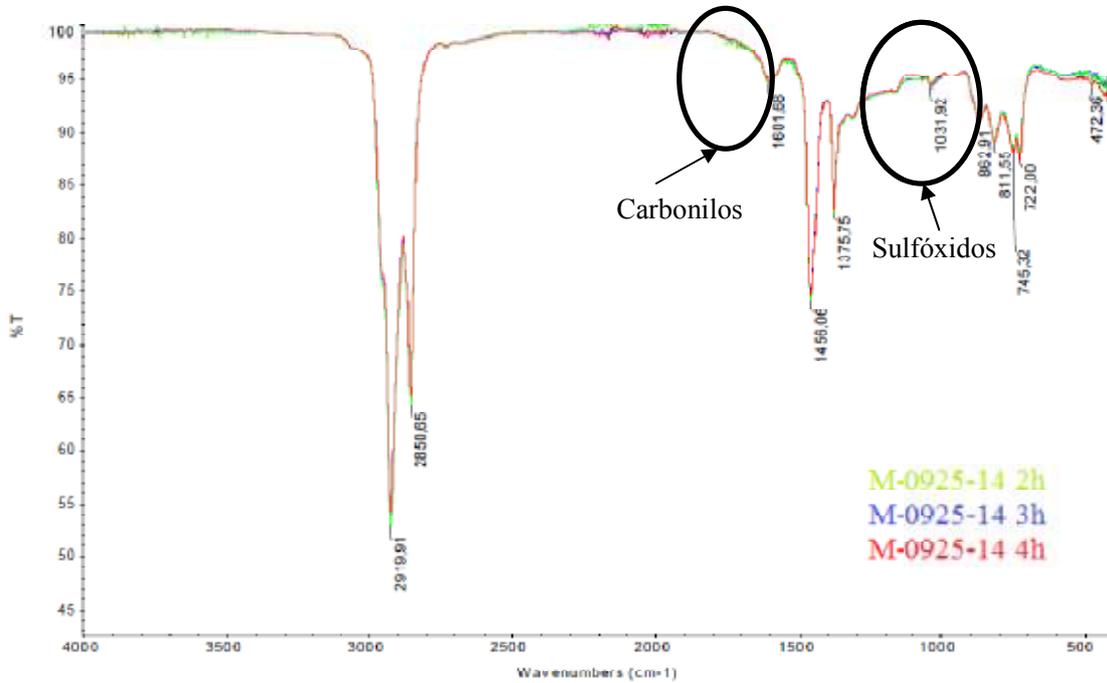


Figura 1. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas

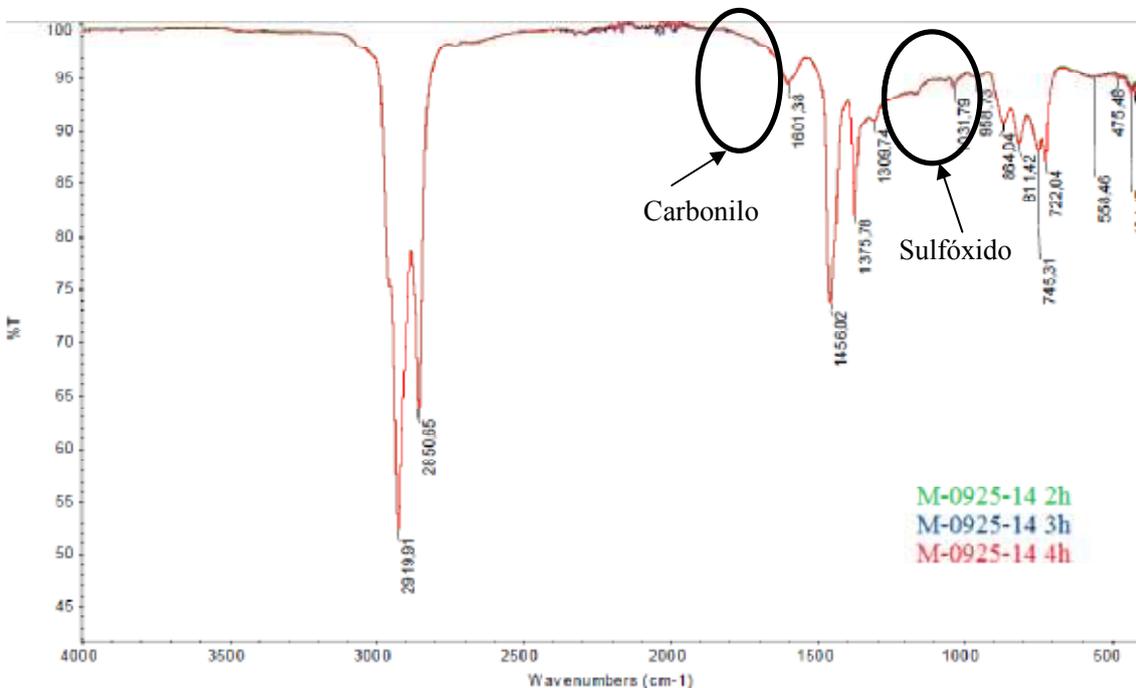


Figura 2. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas

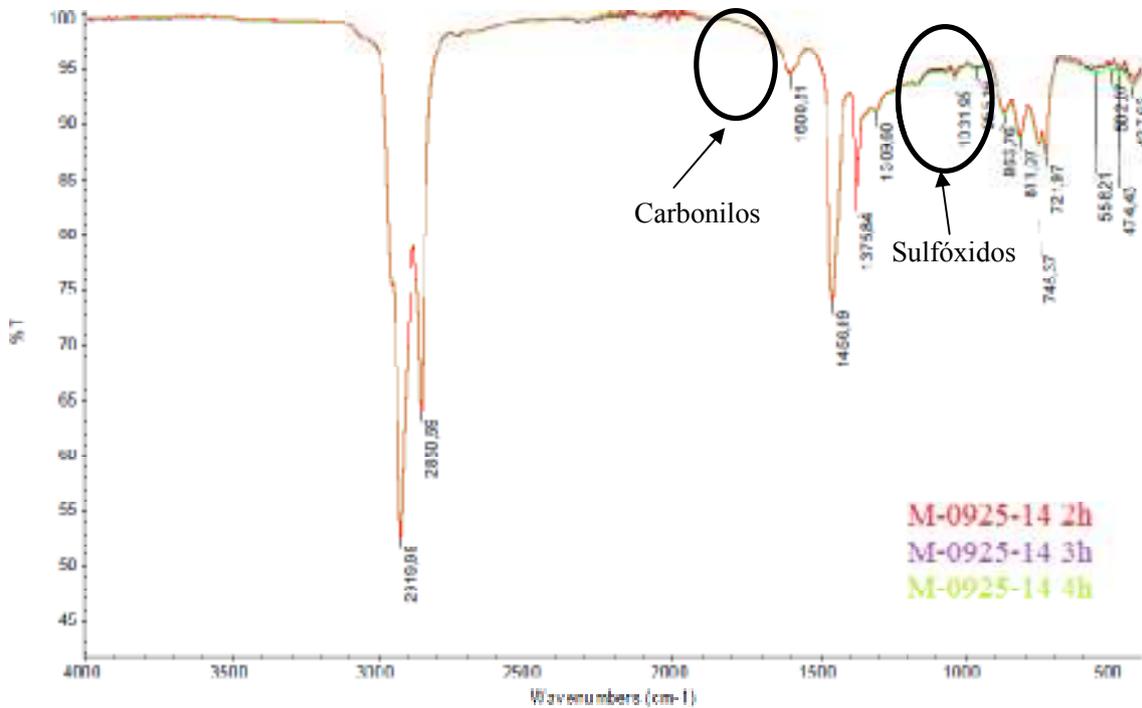


Figura 3. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas

Utilizando el software Omnic se cuantifican las áreas bajo la curva de absorbancia del espectro. Este procedimiento consiste en unir los puntos en la base de la curva y el software calcula el área, lo cual se correlaciona con la concentración presente de cada grupo funcional en la muestra, esto permite comparar numéricamente el cambio como resultado de los acondicionamientos. Se debe utilizar la salida de señales en absorbancia contra número de onda para relacionar de forma directa la intensidad de señal contra la concentración, utilizando los preceptos de la ley de Beer-Lambert. En la Tabla 8 presentan los resultados obtenidos.

La absorbancia es un parámetro adimensional, pero para facilitar la lectura de las áreas se utiliza “A” para representarla. En la Tabla 8 se detallan las áreas estimadas para cada una de las muestras calentadas en el horno. Se observa que la variación es muy baja, el promedio del área de los sulfóxidos es cercano a 0,10 A·cm⁻¹ con una desviación estándar de 0,02 A·cm⁻¹. Para los carbonilos la variación es aún menor, incluso para las muestras de 150 °C y de 165 °C el pico es tan pequeño que no es posible hacer la cuantificación del área con el software. La magnitud de la variación es muy pequeña, el rango de las áreas para los sulfóxidos es de (0,069 a 0,134) A·cm⁻¹ y para los carbonilos es de (0 a 0,036) A·cm⁻¹, con una desviación estándar de 0,023 A·cm⁻¹ y 0,015 A·cm⁻¹, respectivamente.

Informe LM-PI-UMP-056-R4	Fecha de emisión: Febrero 2017	Página 25 de 95
--------------------------	--------------------------------	-----------------



Tabla 8. Área de sulfóxidos y carbonilos para las muestras asfalto calentadas en el horno de convección forzada

M-0925-14	Sulfóxidos ($A \cdot cm^{-1}$)	Carbonilos ($A \cdot cm^{-1}$)
2h 135°C	0,112	0,029
3h 135°C	0,134	0,017
4h 135°C	0,117	0,034
2h 150°C	0,074	0,036
3h 150°C	0,087	0,000
4h 150°C	0,125	0,000
2h 165°C	0,069	0,000
3h 165°C	0,103	0,000
4h 165°C	0,073	0,000
Promedio	0,099	0,013
Desviación estándar	0,024	0,016
Mínimo	0,069	0
Máximo	0,134	0,036

Los resultados no evidencian diferencia significativa con respecto a la primera condición del asfalto, pues al superponer los espectros no se distinguen intensidades distintas en las señales de las muestras. En la Figura 4 se muestra gráficamente la variación para ambos compuestos. El rango de variación de los sulfóxidos des de $0,065 A \cdot cm^{-1}$ y para los carbonilos es de $0,036 A \cdot cm^{-1}$

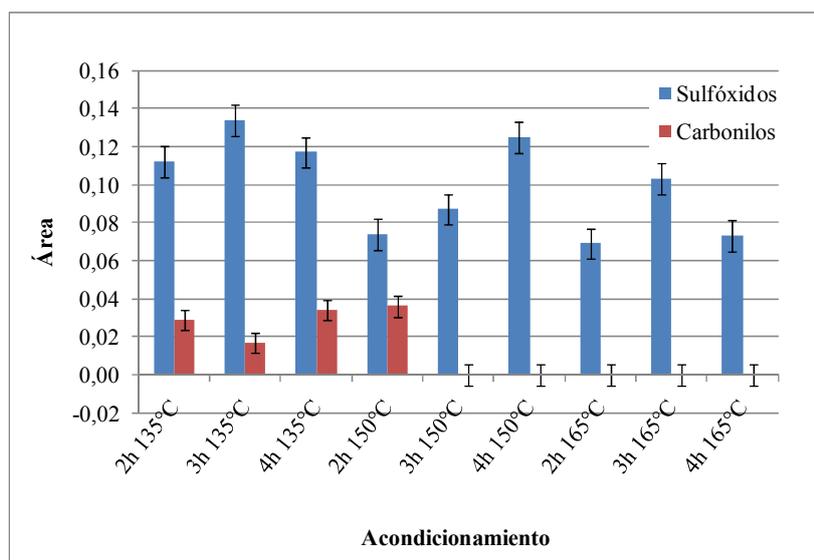


Figura 4. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos y carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada



Al analizar el cambio de áreas con respecto al tiempo y la temperatura no es posible encontrar una tendencia que permita afirmar que hay una correlación directa entre las variables mencionadas y el área obtenida de los grupos funcionales relacionados con la oxidación. En la Figura 5 se muestra el comportamiento para los sulfóxidos. Al suponer que la temperatura tiene un efecto directo sobre la oxidación, lo que se esperaría observar en el gráfico es que el área obtenida para 165 °C debería ser mayor en todos los casos, lo cual no sucede incluso es mayor la obtenida para las condiciones de 135 °C en todos los periodos. Igualmente se debería observar una tendencia de incremento conforme se aumenta el tiempo de calentamiento para cada temperatura, lo cual solo sucede para la temperatura de 150 °C pero con resultados mayores en dos puntos a los reportados a 165 °C.

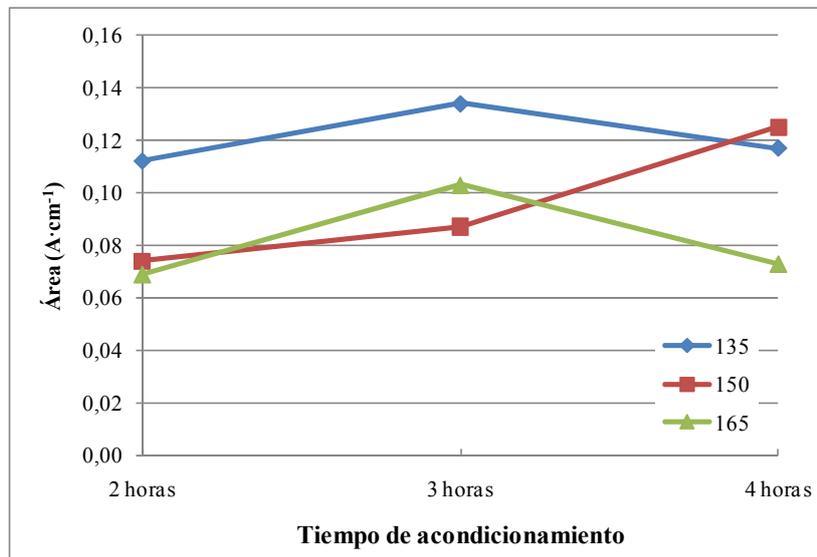


Figura 5. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada

En el caso de los carbonilos, la ausencia de una tendencia es aún más evidente pues a 165 °C ni siquiera es posible cuantificar cambios en el área de la señal y a 150 °C el área disminuye conforme se aumenta el tiempo de exposición a la temperatura. Se puede deducir que los cambios percibidos se deben a la variabilidad inherente de la medición.

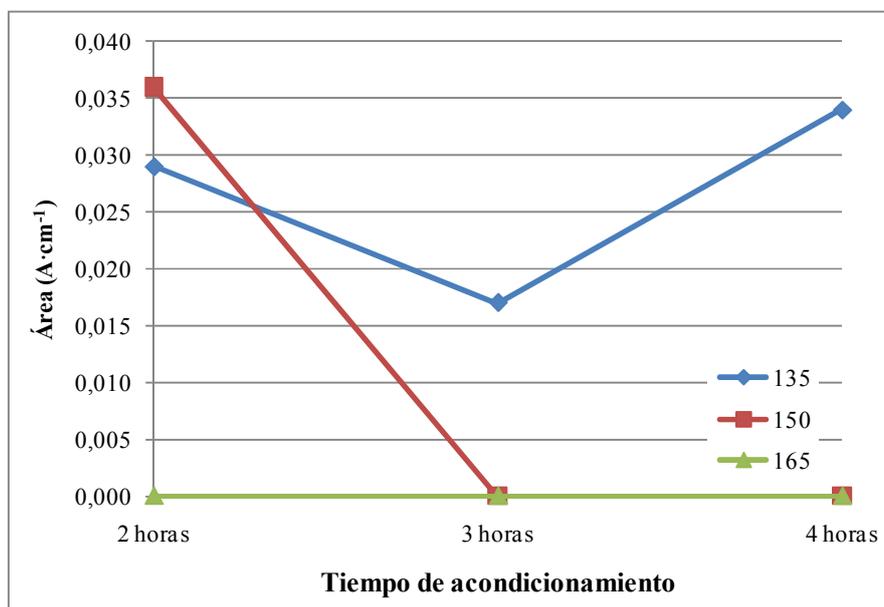


Figura 6. Comparación de las áreas de las señales de carbonilos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada

Para el acondicionamiento del asfalto en el recipiente de calentamiento, como se mencionó anteriormente, se utilizan los tiempos que recomienda el proveedor de los polímeros o el que se estableció en el Informe LM-PI-UMP-035 (Rodríguez-Castro, Salazar-Delgado, Zúñiga-Araya, & Aguiar-Moya, 2014). En la Figura 7 se muestra el espectro para las condiciones indicadas y al igual que las condiciones analizadas anteriormente, no se aprecian cambios significativos en las señales.

En la Tabla 9 se resume la cuantificación de las áreas para cada acondicionamiento, como se observa los resultados son muy similares y al igual que en el caso anterior es difícil establecer alguna tendencia que demuestre que alguno tiene mayor efecto en el aumento de la presencia de los grupos funcionales relacionados con la oxidación.

Para los sulfóxidos se aprecia que la mayor área la presenta la temperatura más baja al menor tiempo utilizado, la mayor área para los carbonilos también se presenta en el mismo acondicionamiento, sin embargo, el área más baja se observa para el calentamiento a 180 °C durante 3:30 h, a diferencia de lo observado para los sulfóxidos.

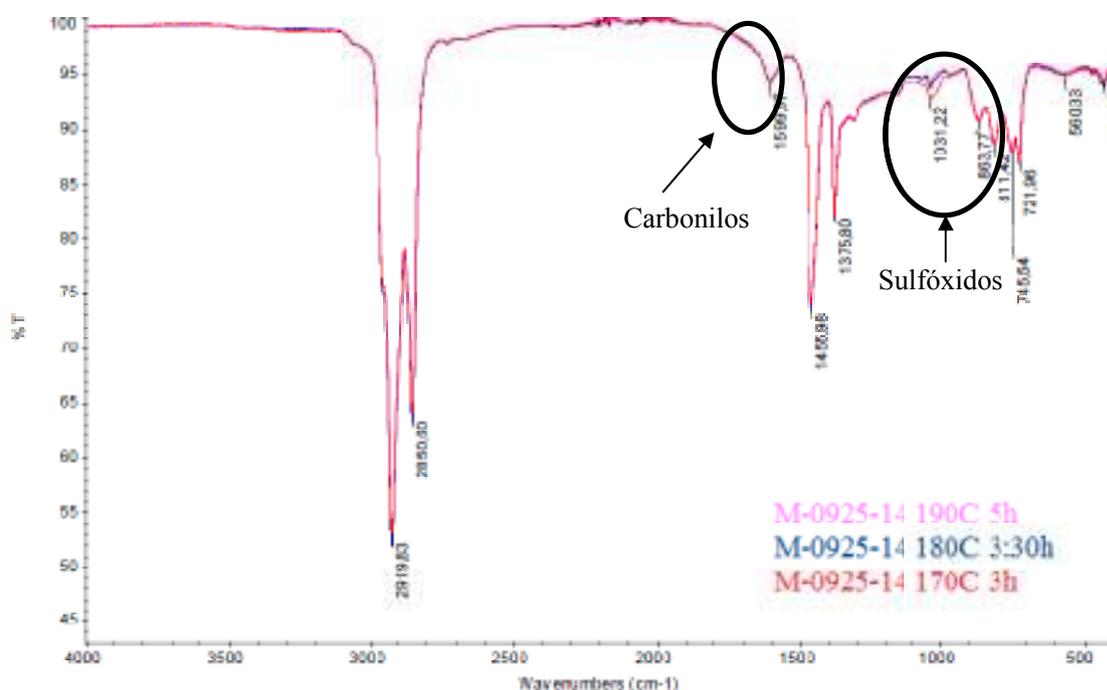


Figura 7. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el en el recipiente de mezclado a 170 °C, 180 °C y 190 °C en condición original

Tabla 9. Área de sulfóxidos y carbonilos para las muestras asfalto calentadas en el recipiente de modificación

M-0925-14	Sulfóxidos ($A \cdot cm^{-1}$)	Carbonilos ($A \cdot cm^{-1}$)
3h 170°C MD	0,190	0,013
3:30h 180°C MD	0,107	0,000
5h 190°C MD	0,093	0,008
Promedio	0,130	0,008
Desviación estándar	0,0524	0,0055
Mínimo	0,093	0,000
Máximo	0,19	0,013

En la Figura 8 se comparan gráficamente los resultados las áreas para los sulfóxidos y los carbonilos.

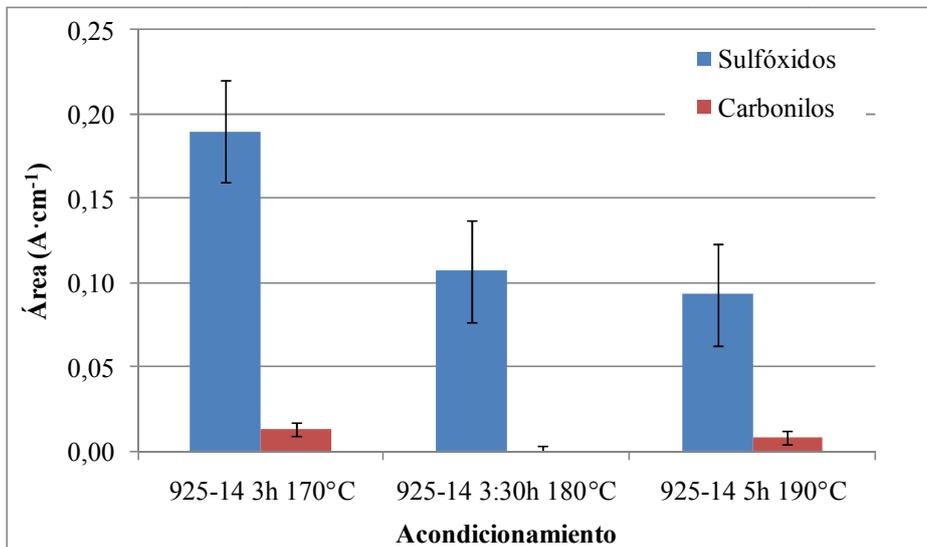


Figura 8. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos y carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el recipiente de mezclado

Al comparar los resultados del acondicionamiento en el horno de convección forzada y el recipiente de modificación se obtiene que la mayor área de la señal de los sulfóxidos, lo presenta la muestra a 170 °C durante 3 horas. Al representarlo gráficamente es claro que sobrepasa en 0,06 unidades a la muestra que tiene la segunda posición con respecto al área que corresponde a la muestra calentada a 135 °C durante 3 horas en el horno de convección forzada. (Ver Figura 9). En contraposición la menor área corresponde a la muestra calentada en el horno de convección forzada durante 4 horas a 165 °C, que supera por muy poco a la calentada por 2 horas a 150 °C. Esta última tiene el área mayor para el grupo de carbonilos.

Es importante notar que, a pesar de que no se puede relacionar alguna tendencia con los resultados, la muestra calentada en el recipiente de mezclado a 170 °C durante 3 horas es la que tiene la señal con mayor área para los sulfóxidos y es la única muestra acondicionada en el recipiente de mezclado que tiene un valor superior a 0,0 A·cm⁻¹.



Tabla 10. Área de sulfóxidos y carbonilos para las muestras calentadas en el horno de convección forzada y en el recipiente de modificación

M-0925-14	Sulfóxidos ($A \cdot cm^{-1}$)	Carbonilos ($A \cdot cm^{-1}$)
2h 135°C	0,112	0,029
3h 135°C	0,134	0,017
4h 135°C	0,117	0,034
2h 150°C	0,074	0,036
3h 150°C	0,087	0,000
4h 150°C	0,125	0,000
2h 165°C	0,069	0,000
3h 165°C	0,103	0,000
4h 165°C	0,073	0,000
3h 170°C MD	0,190	0,013
3:30h 180°C MD	0,107	0,000
5h 190°C MD	0,093	0,008
Promedio	0,107	0,011
Desviación estándar	0,0335	0,0143
Mínimo	0,069	0
Máximo	0,190	0,036

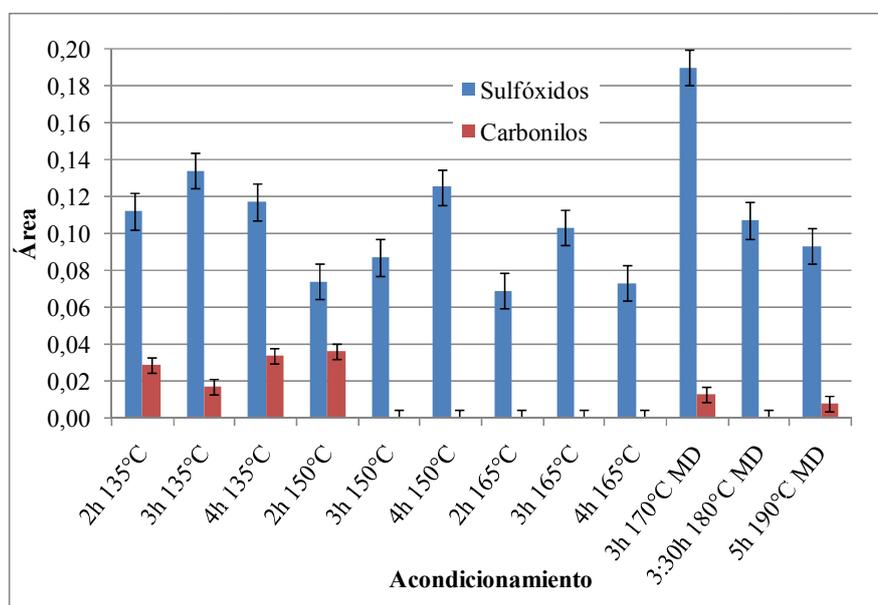


Figura 9. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos y carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el recipiente de mezclado y en el horno de convección forzada



La hipótesis que se plantea en este proyecto se basa en que la exposición únicamente a la temperatura no provoca la oxidación que afecta el desempeño del asfalto. Para corroborar este punto se acondicionan las muestras de asfalto mediante los ensayos usuales que simulan los procesos de mezclado en planta, colocación en campo y del pavimento en servicio.

El primer acondicionamiento se realiza en el horno rotatorio de película delgada (RTFO, por sus siglas en inglés) que pretende replicar las condiciones a las que se expone el asfalto durante el mezclado en planta de producción y durante la colocación de la mezcla asfáltica en el campo. El ensayo consiste en exponer la muestra a condiciones críticas, colocando la muestra en recipientes que garanticen la exposición de todo el material a una corriente de aire con flujo constante de 4 mL/min y a una temperatura de 163 °C durante 85 minutos. (Ver Figura 10)



Figura 10. Horno Rotatorio de Película Delgada. Los especímenes se colocan en posición horizontal, lo cual asegura que en la rotación todo el asfalto esté expuesto a las condiciones de aire y temperatura. (b) Recipiente de muestra

Después del acondicionamiento en el RTFO, la muestra se trasvasa a los platos del recipiente de envejecimiento a presión (PAV, por sus siglas en inglés). Con esto se intenta completar la simulación, pues después con condiciones con aire ultra puro se alcanza una presión de 21, MPa a una temperatura de 100 °C ± 5 °C durante 20 horas para replicar el envejecimiento que sufre el pavimento durante, aproximadamente, 10 años.



(a)



(b)

Figura 11. Recipiente de Envejecimiento a presión. Los especímenes se trasvasan a los platos y se introducen al equipo en el dispositivo que se muestra en (b)

El proceso de envejecimiento que se produce con el RTFO se relaciona con la oxidación a corto plazo, en la cual se espera la formación de sulfóxidos. Se espera que la oxidación a largo plazo que se simula con el acondicionamiento en el PAV incremente la concentración de sulfóxidos y carbonilos (Salazar-Delgado, Pacheco-Fallas, Aguiar-Moya, & Rodríguez-Castro, 2016).

Para cuantificar la presencia de sulfóxidos y carbonilos, se realizó espectroscopia infrarroja cada una de las muestras en estudio. Los espectros de las muestras que se acondicionaron en el horno de convección forzada se presentan en las siguientes figuras. En todos los casos es evidente el efecto que el PAV.

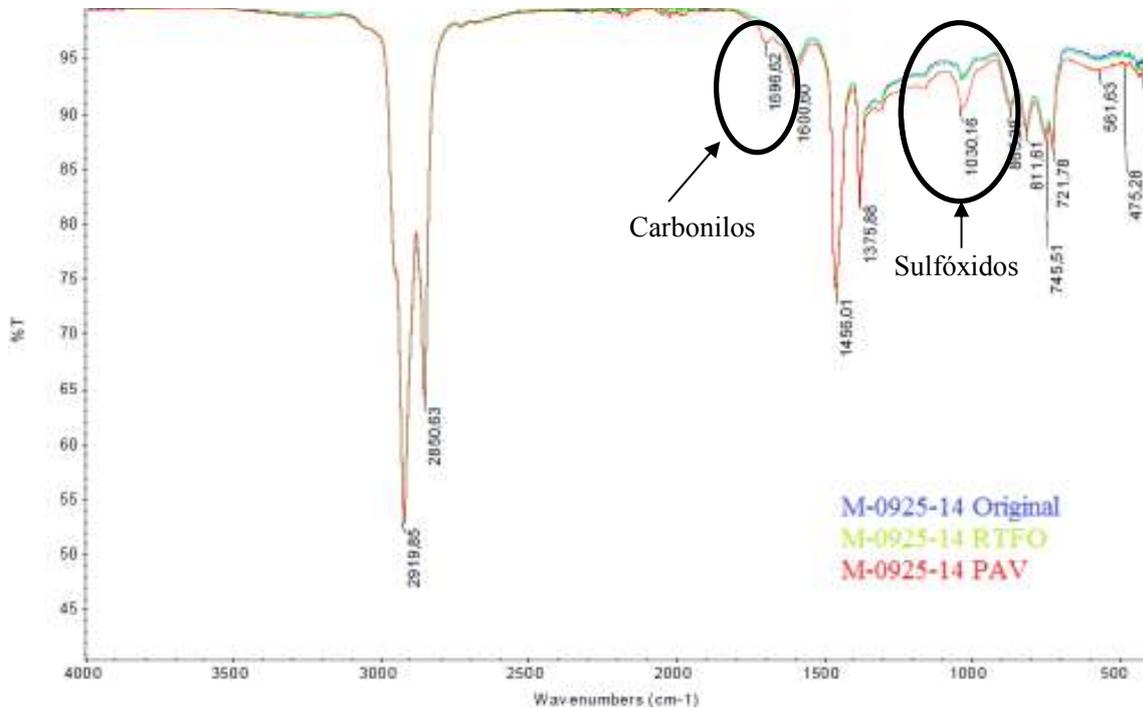


Figura 12. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C a 2 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

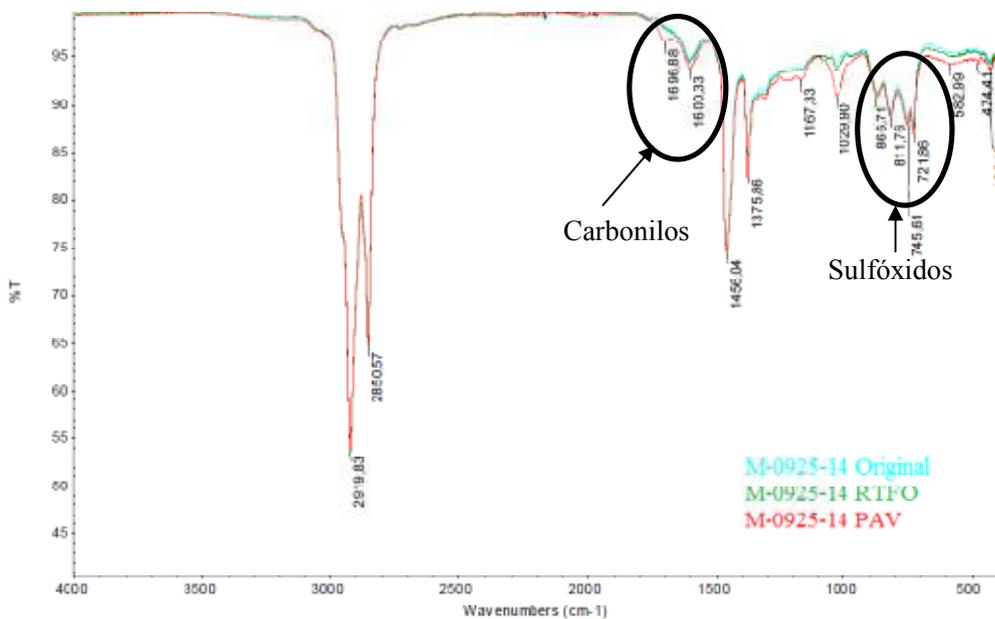


Figura 13. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C a 3 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

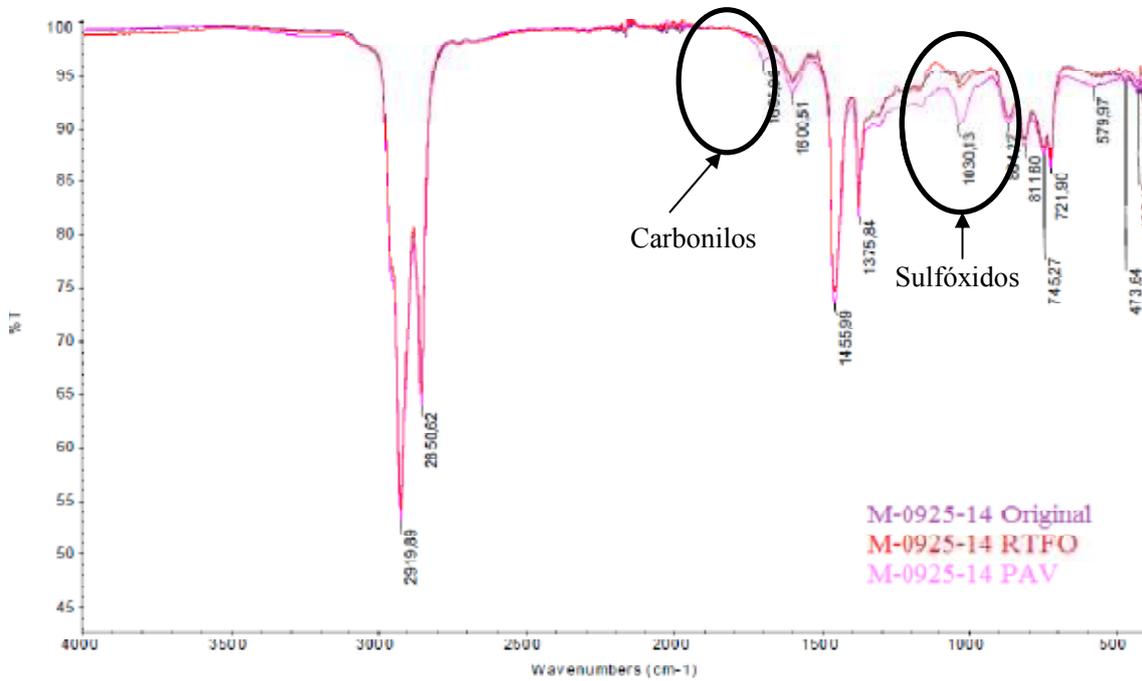


Figura 14. Comparación de los espectros de las muestra calentada en el horno de convección forzada a 135 °C a 4 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

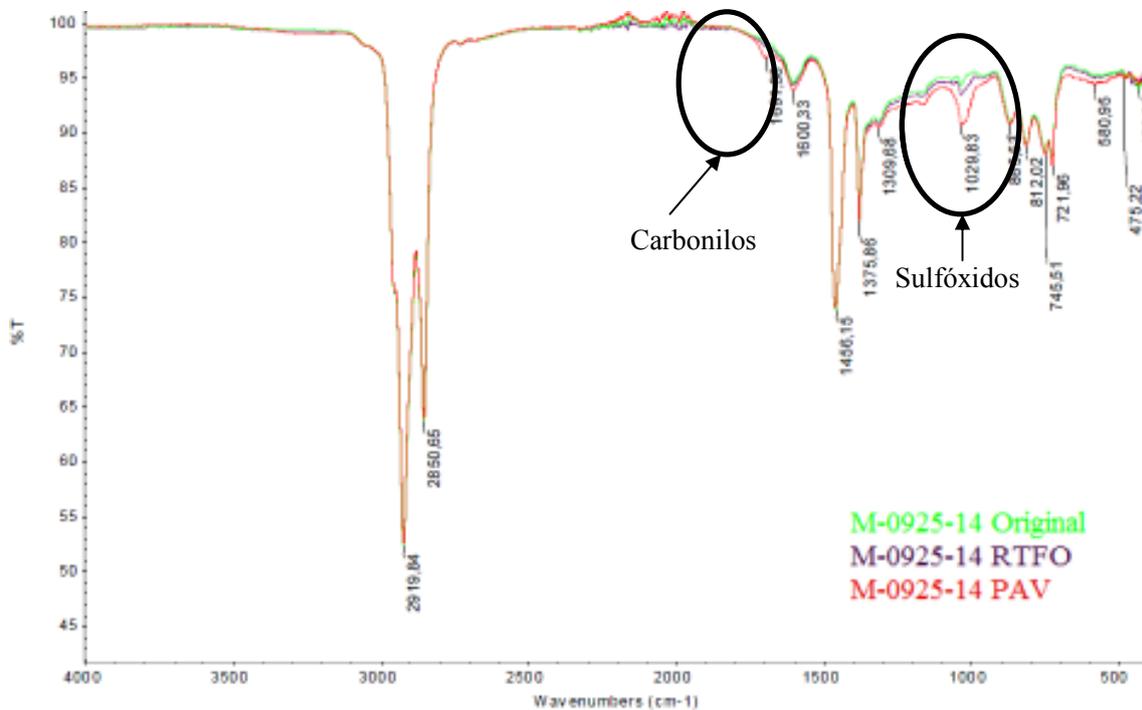


Figura 15. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C a 2 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

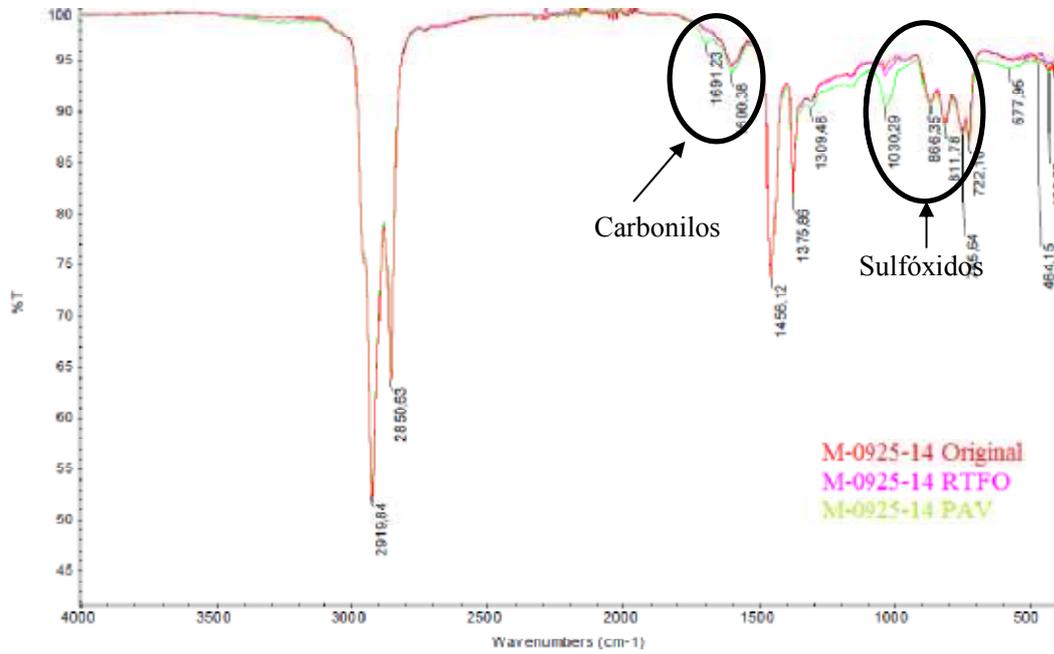


Figura 16. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C a 3 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

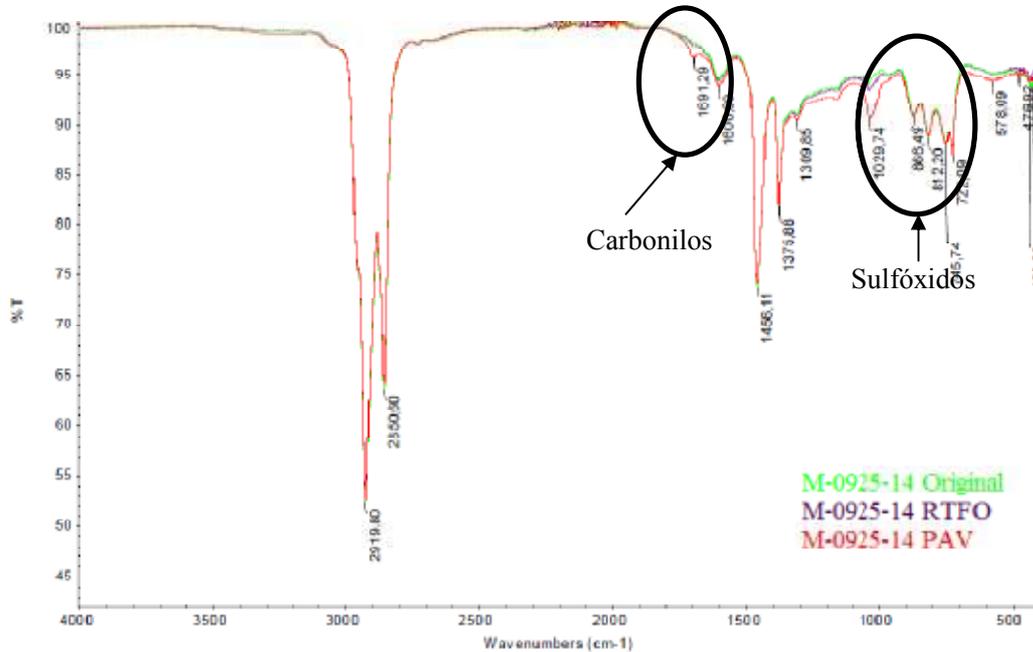


Figura 17. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C a 4 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

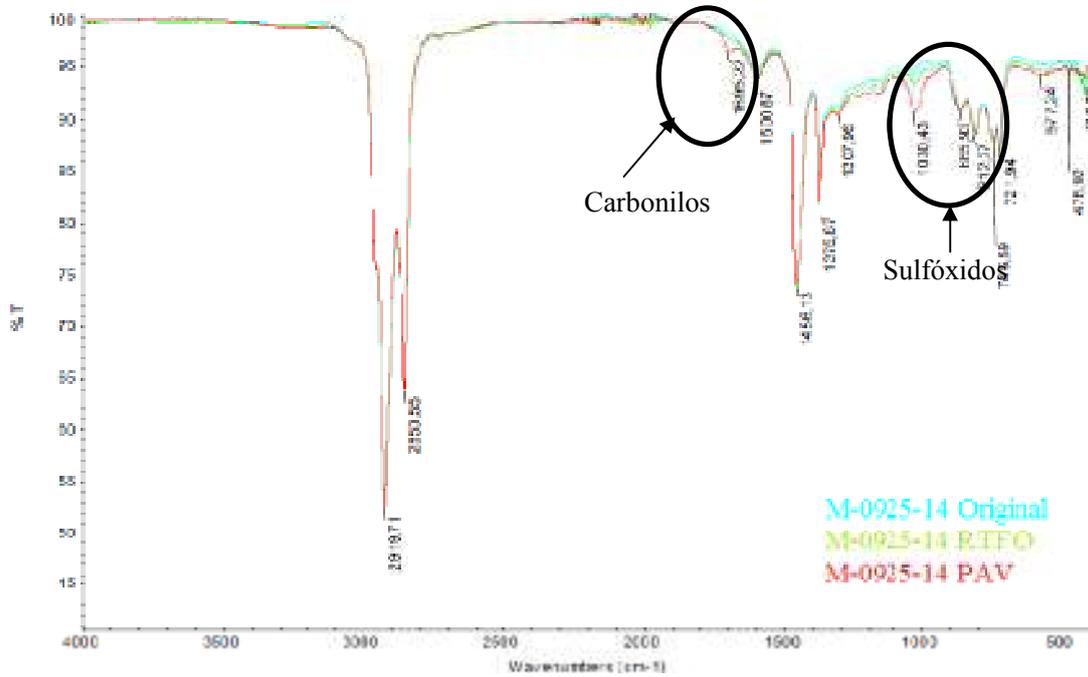


Figura 18. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 165 °C a 2 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

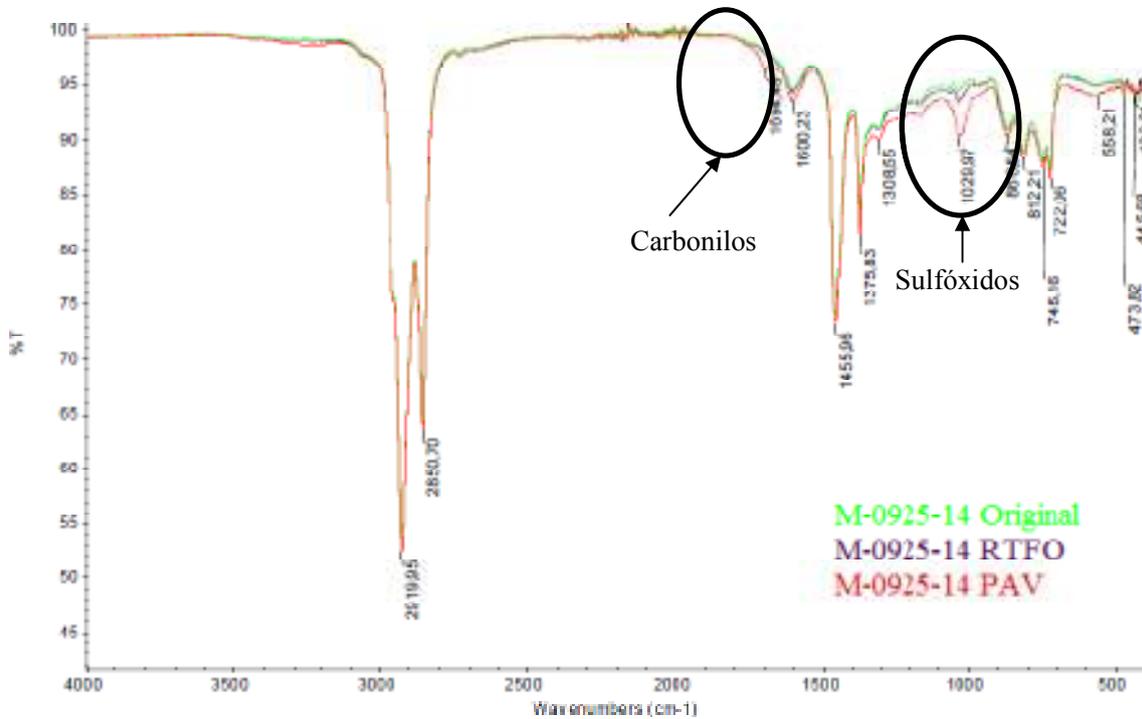


Figura 19. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 165 °C a 3 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

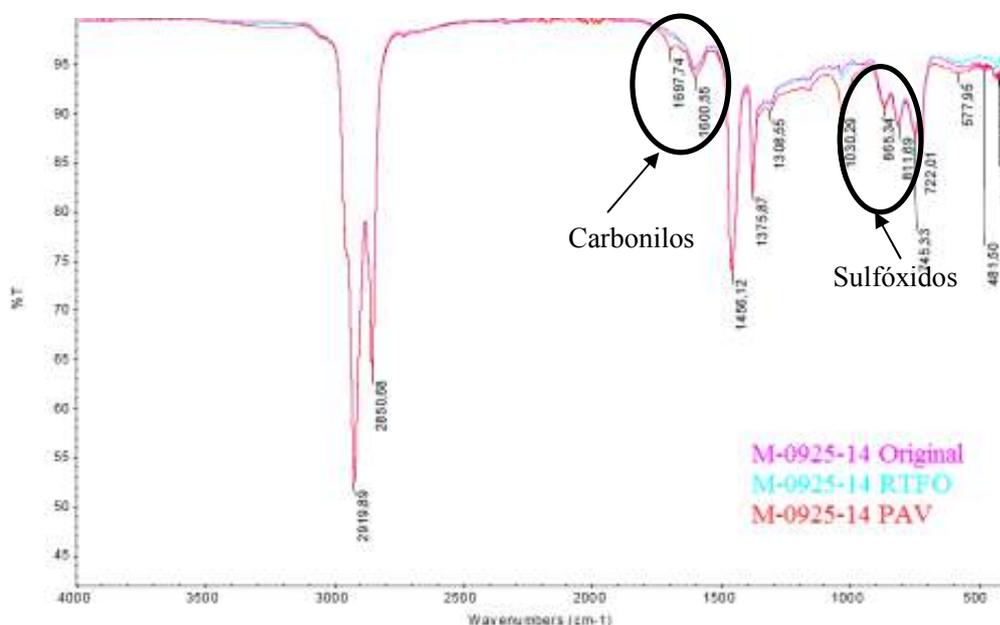


Figura 20. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 165 °C a 4 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

Los resultados se aprecian mejor en la Tabla 11. En el caso de los sulfóxidos después del RTFO no se aprecian diferencias significativas entre las muestras, tampoco sucede después del PAV.

Tabla 11. Área de sulfóxidos y carbonilos para la muestra de asfalto después del acondicionamiento en RTFO y PAV de las muestras asfalto calentadas en el horno de convección forzada.

M-925-14	Sulfóxidos ($A \cdot cm^{-1}$)		Carbonilos ($A \cdot cm^{-1}$)	
	RTFO	RTFO+PAV	RTFO	RTFO+PAV
2h 135°C	0,186	0,768	0,065	0,121
3h 135°C	0,199	0,761	0,029	0,093
4h 135°C	0,214	0,901	0,04	0,097
2h 150°C	0,180	0,785	0,063	0,103
3h 150°C	0,183	0,829	0	0,106
4h 150°C	0,196	0,852	0,014	0,113
2h 165°C	0,205	0,805	0	0,109
3h 165°C	0,174	0,963	0	0,121
4h 165°C	0,177	0,768	0	0,094
Promedio	0,190	0,826	0,023	0,106
Desviación estándar	0,014	0,069	0,027	0,011
Mínimo	0,174	0,761	0,00	0,093
Máximo	0,214	0,963	0,065	0,121

Las áreas de los carbonilos después del RTFO mantienen un comportamiento similar al de las muestras antes del RTFO, donde las áreas para algunas condiciones son incuantificables, pero después del RTFO + PAV es importante mencionar que todas las muestras registran un aumento en el área de la señal de los carbonilos.

En la Figura 21 se comparan las áreas de las señales de sulfóxidos y carbonilos para cada una de las muestras acondicionadas en el horno de convección forzada.

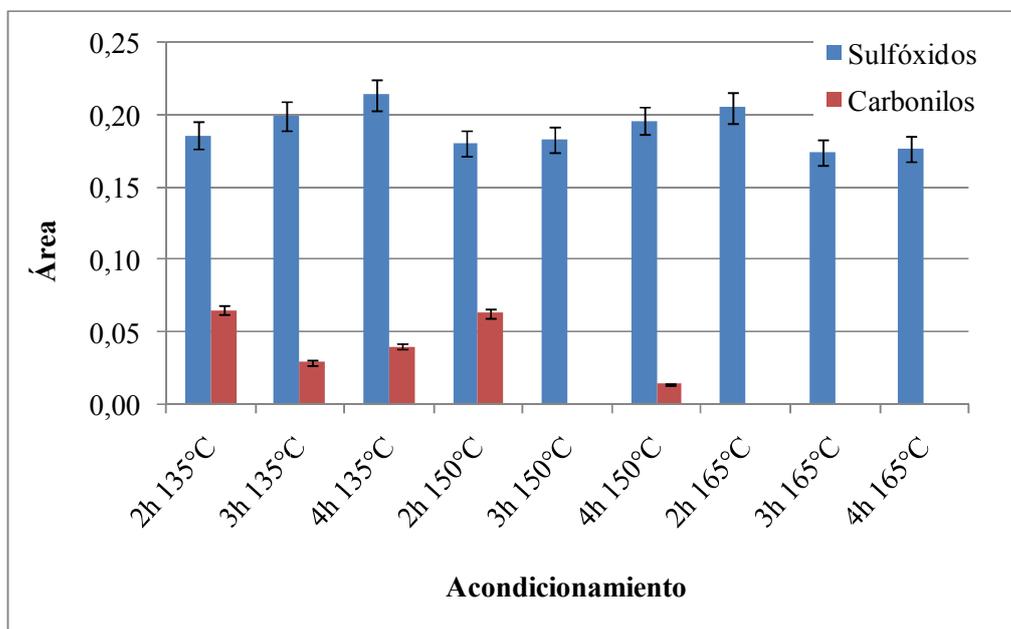


Figura 21. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos y carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada después del RTFO

Al comparar estos resultados con los presentados en la Figura 4, se repite el comportamiento de los carbonilos pues no es posible medir el área, excepto para la muestra acondicionada en la muestra calentada a 150 °C durante 4 horas.

Al comparar las áreas de las muestras después del RTFO + PAV, se aprecia para todas las muestras un incremento en la concentración de sulfóxidos y se logra medir carbonilos en todas las muestras con un valor es cerca a 0,1 A·cm⁻¹ (Ver Figura 22)

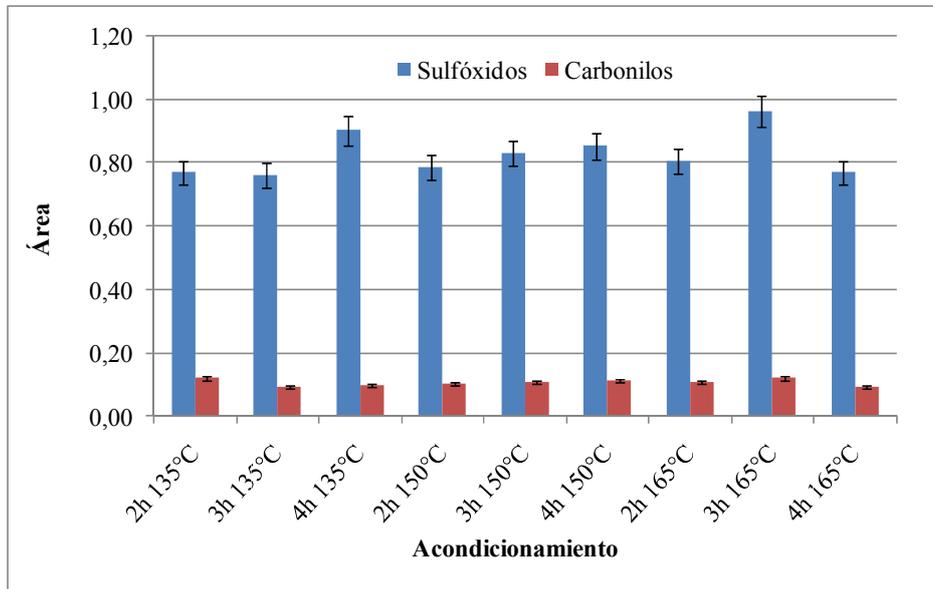


Figura 22. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos y carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada después del RTFO + PAV

Al comparar los resultados obtenidos para la señal de sulfóxidos en todas las condiciones se observa que el área aumenta después del RTFO aumenta y después del RTFO + PAV se cuadruplica. (Ver Figura 26)

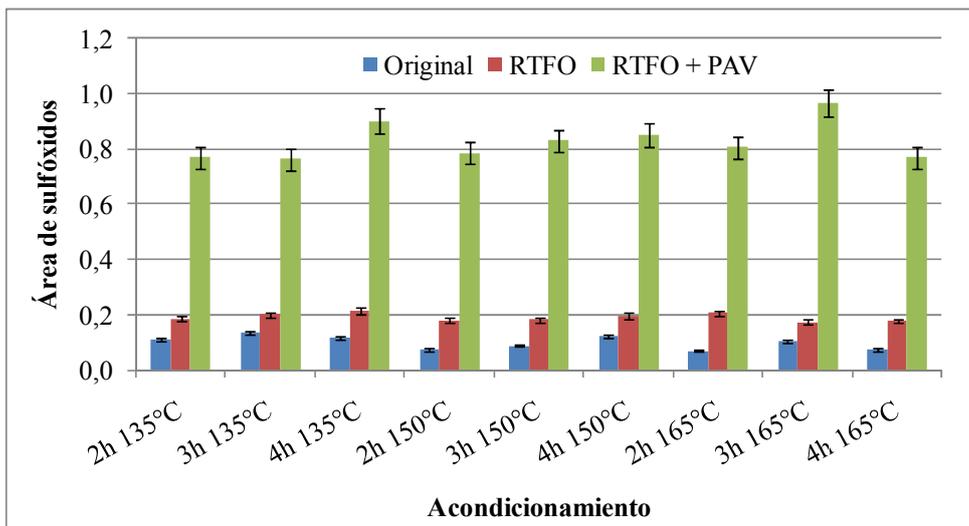


Figura 23. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada para las muestras originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV



Un comportamiento similar se observa con los carbonilos (ver Figura 24). Incluso en las muestras que se acondicionan a mayor temperatura, solo se detecta la presencia de carbonilos después del RTFO+PAV. Es importante notar que las diferencias entre el área de la señal después del RTFO y después de RTFO + PAV no es tan grande como sucede en los sulfóxidos.

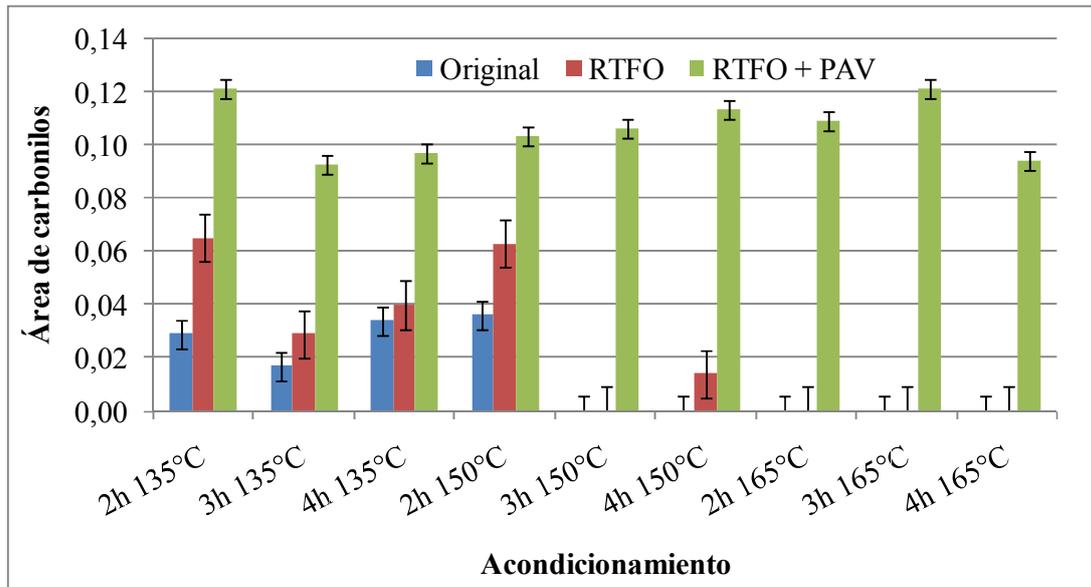


Figura 24. Comparación de las áreas de las señales de carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada para las muestras originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV

Las muestras calentadas en el recipiente de mezclado presentan un comportamiento similar al que se observa para las muestras calentadas en el horno de convección forzada después del RTFO y del RTFO + PAV.

Es decir, la señal de los sulfóxidos y carbonilos se incrementa después del RTFO y mucho más después del RTFO + PAV como se aprecia en las figuras siguientes.

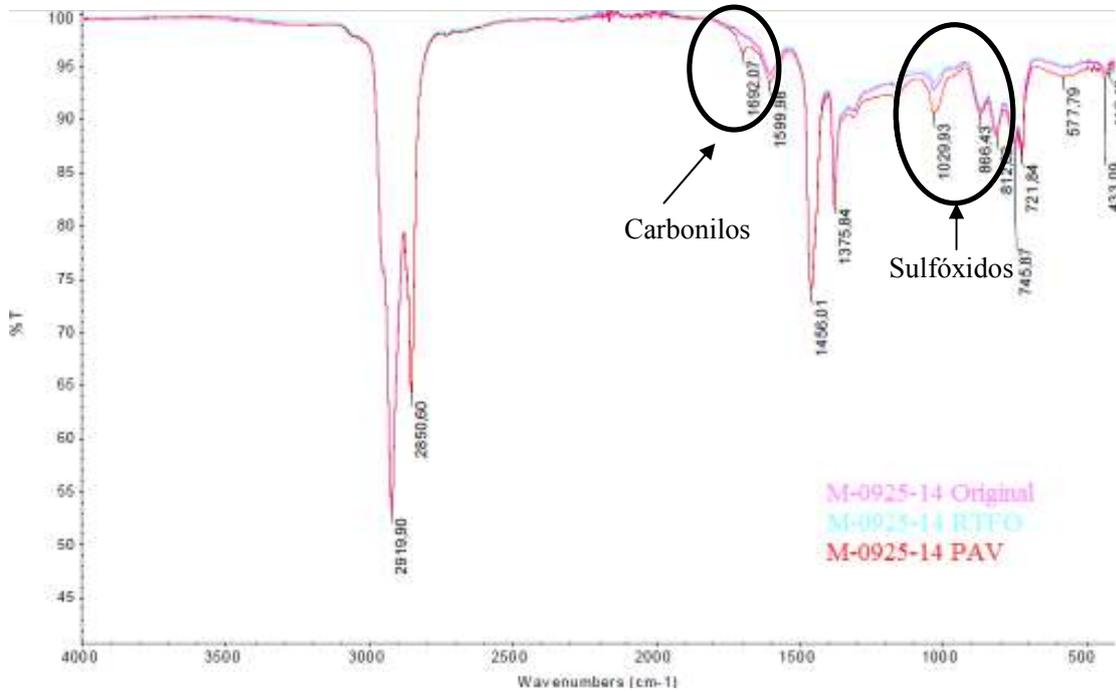


Figura 25. Comparación de los espectros de la muestra calentada en el recipiente de mezclado a 170 °C 3 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el RTFO + PAV

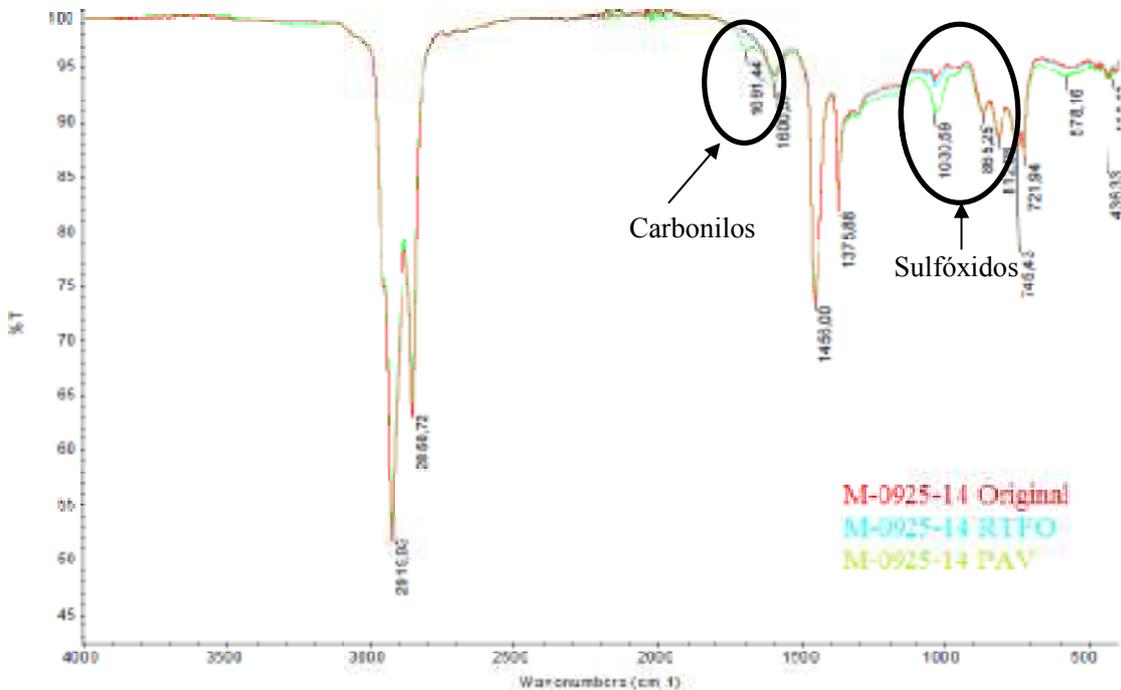


Figura 26. Comparación de los espectros de la muestra calentada en el recipiente de mezclado a 180 °C 3:30 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV.

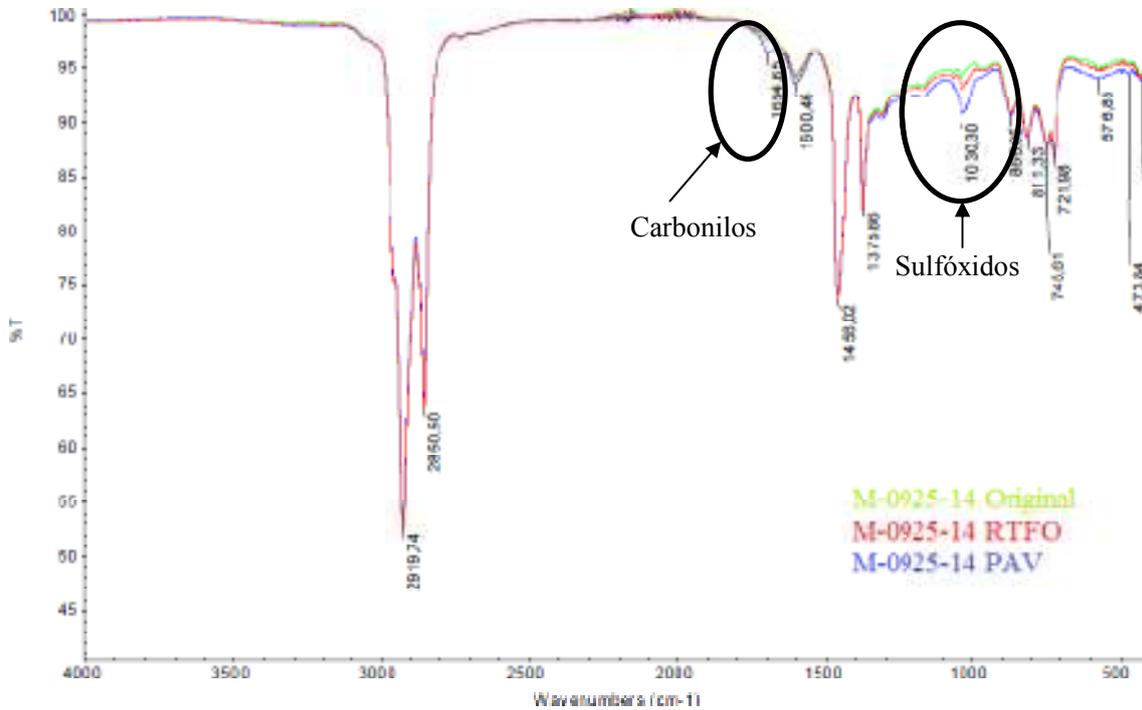


Figura 27. Comparación de los espectros de la muestra calentada en el recipiente de mezclado a 190 °C 5 horas, acondicionado en el RTFO y acondicionado en el PAV

Tabla 12. Área de sulfóxidos y carbonilos para la muestra de asfalto después del acondicionamiento en RTFO y PAV de las muestras asfalto calentadas en el recipiente de mezclado

M-925-14	Sulfóxidos (A·cm ⁻¹)		Carbonilos (A·cm ⁻¹)	
	RTFO	RTFO+PAV	RTFO	RTFO+PAV
3h 170°C MD	0,292	0,861	0,026	0,142
3:30h 180°C MD	0,202	0,762	0,000	0,113
5h 190°C MD	0,196	0,696	0,016	0,117
Promedio	0,230	0,773	0,014	0,124
Desviación estándar	0,054	0,083	0,013	0,016
Mínimo	0,196	0,696	0,000	0,113
Máximo	0,292	0,861	0,026	0,142

Al comparar los resultados de las áreas de los sulfóxidos y los carbonilos después del RTFO y después del RTFO + PAV cuando se utiliza el recipiente de mezclado, se obtienen comportamientos similares a los que se con el horno de convección forzada (Ver Figura 28 y Figura 29).

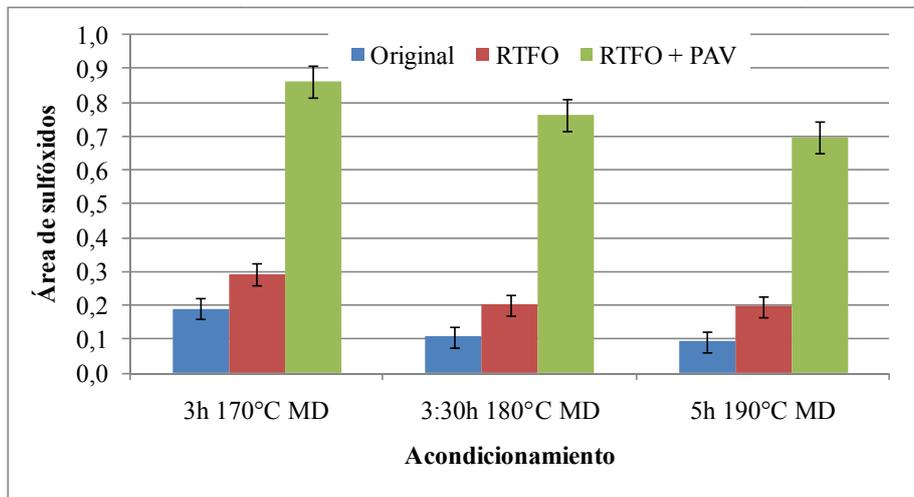


Figura 28. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el recipiente de mezclado para las muestras originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV

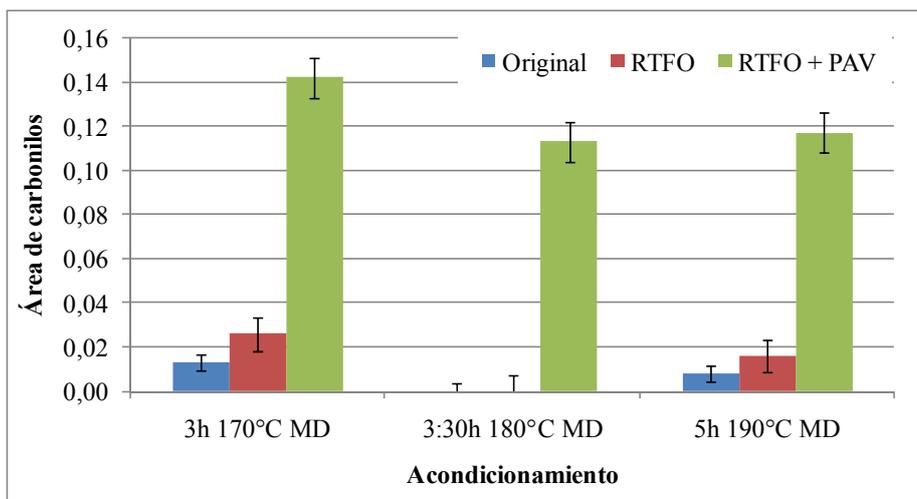


Figura 29. Comparación de las áreas de las señales de carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el recipiente de mezclado para las muestras originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV

Es importante notar que tanto para los sulfóxidos y carbonilos las áreas son mayores para la muestra calentada durante 3 horas a 170 °C.

Se puede afirmar que la presencia de carbonilos no se debe únicamente a la temperatura sino es resultado de la combinación de temperatura, aire y presión. Esto es más evidente si se comparan los espectros de todas las muestras bajo las distintas condiciones que se muestran en las siguientes figuras.

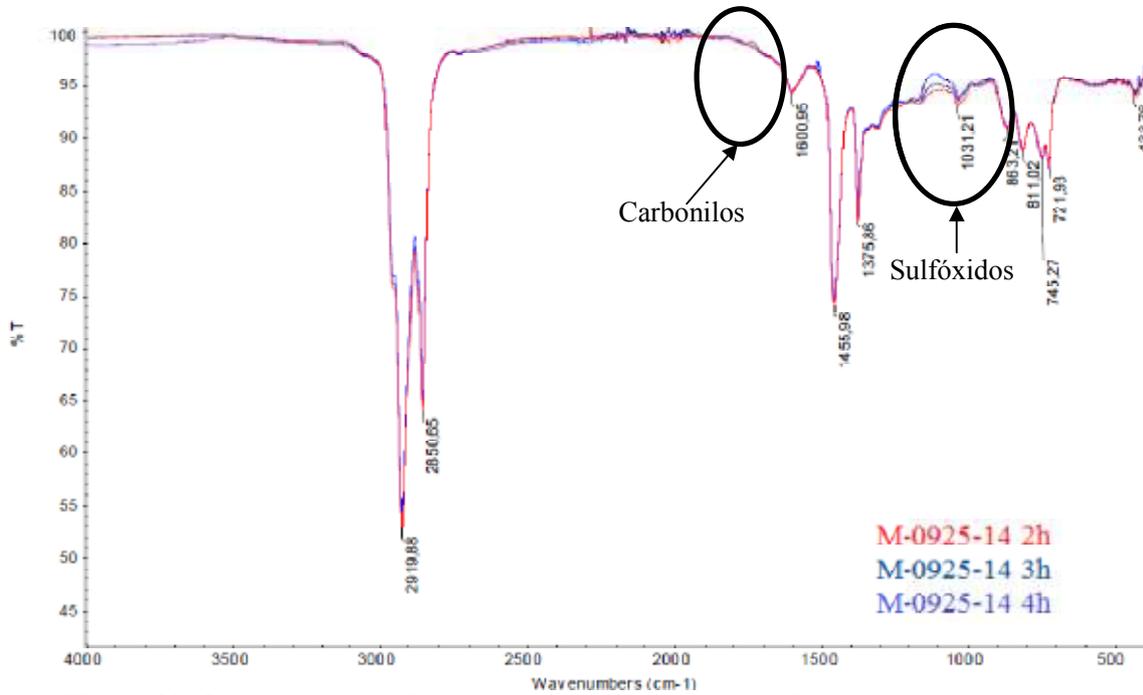


Figura 30. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionadas en el RTFO

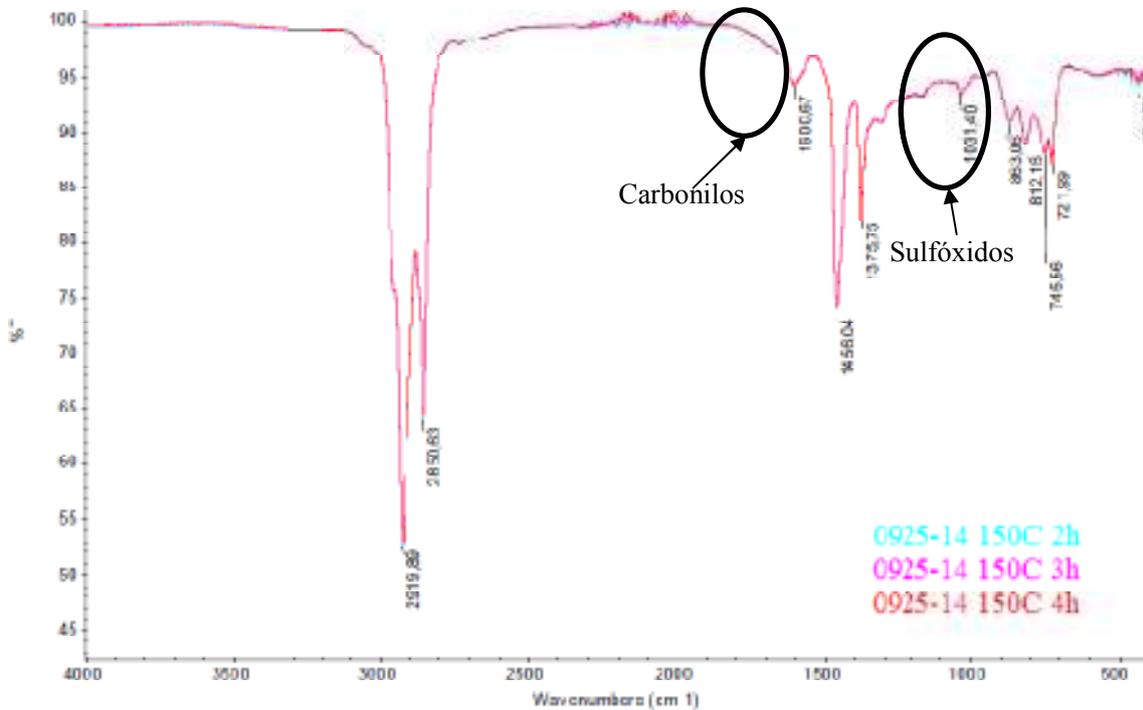


Figura 31. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionadas en el RTFO

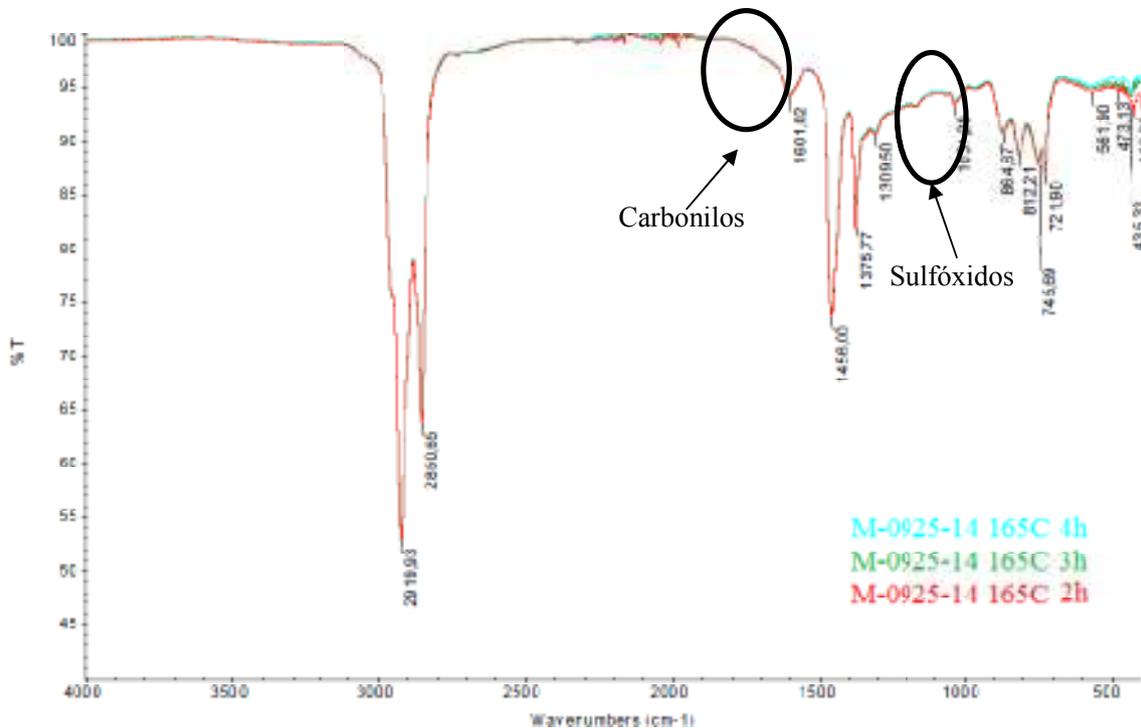


Figura 32. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionadas en el RTFO

Las Figura 30, Figura 31 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corresponden a los espectros después del RTFO de las muestras calentadas en el horno a 135 °C, 150 °C y 165 °C durante los periodos fijados de 2, 3 y 4 horas. Las señales de los grupos funcionales en estudio no revelan cambio significativo, incluso es difícil distinguir un espectro de otro en cada figura.

En las Figuras Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se aprecia el mismo comportamiento para las muestras calentadas en el horno de convección forzada después del RTFO + PAV

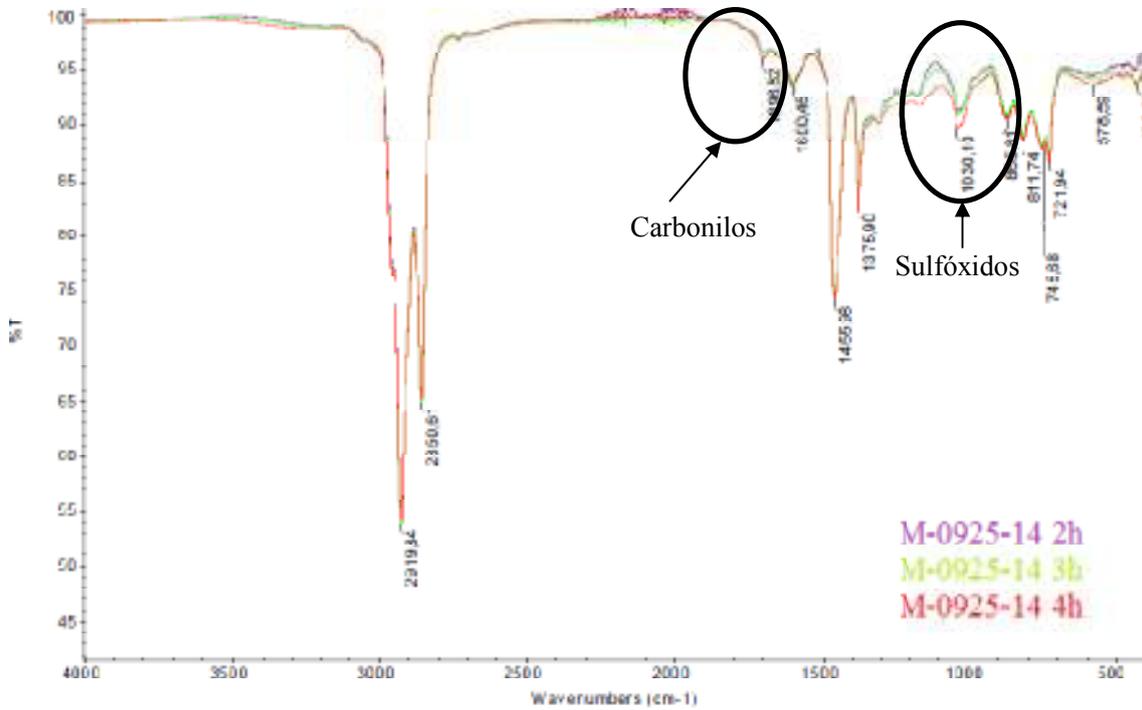


Figura 33. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionadas en el RTFO + PAV

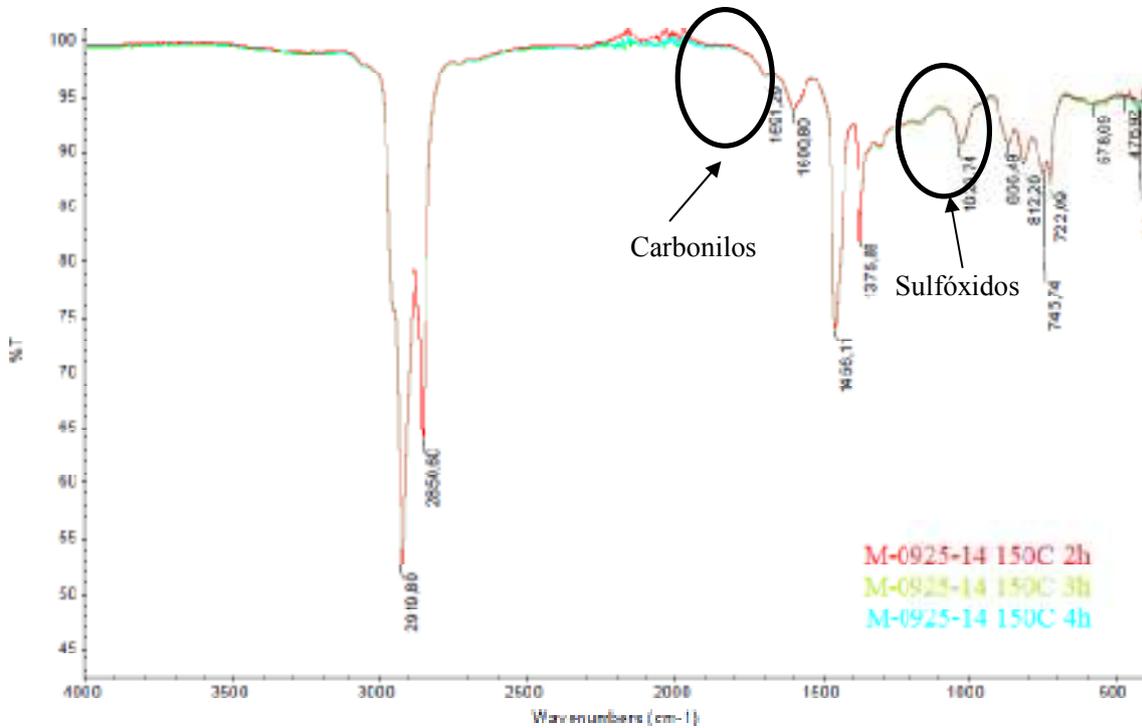


Figura 34. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionadas en el RTFO + PAV

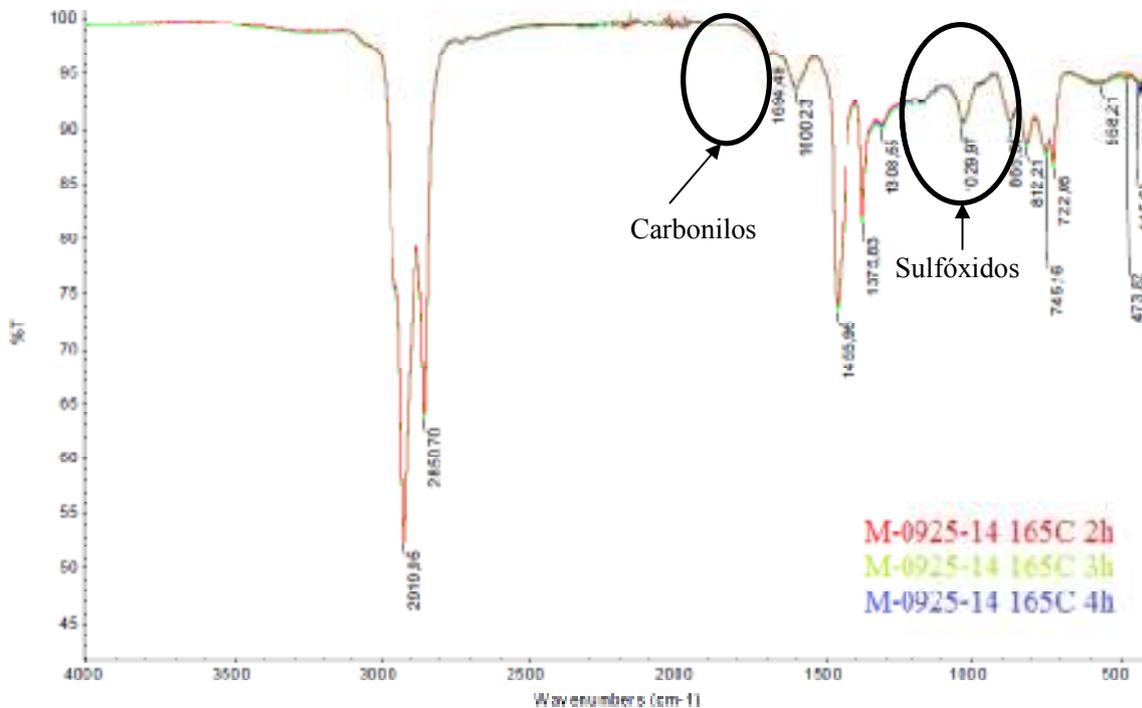


Figura 35. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionadas en el RTFO + PAV

A manera de ilustración se presentan los espectros juntos de todas las muestras para demostrar que no es posible distinguir diferencias en las señales de sulfóxidos y carbonilos como resultado del aumento de la temperatura o del periodo de calentamiento.

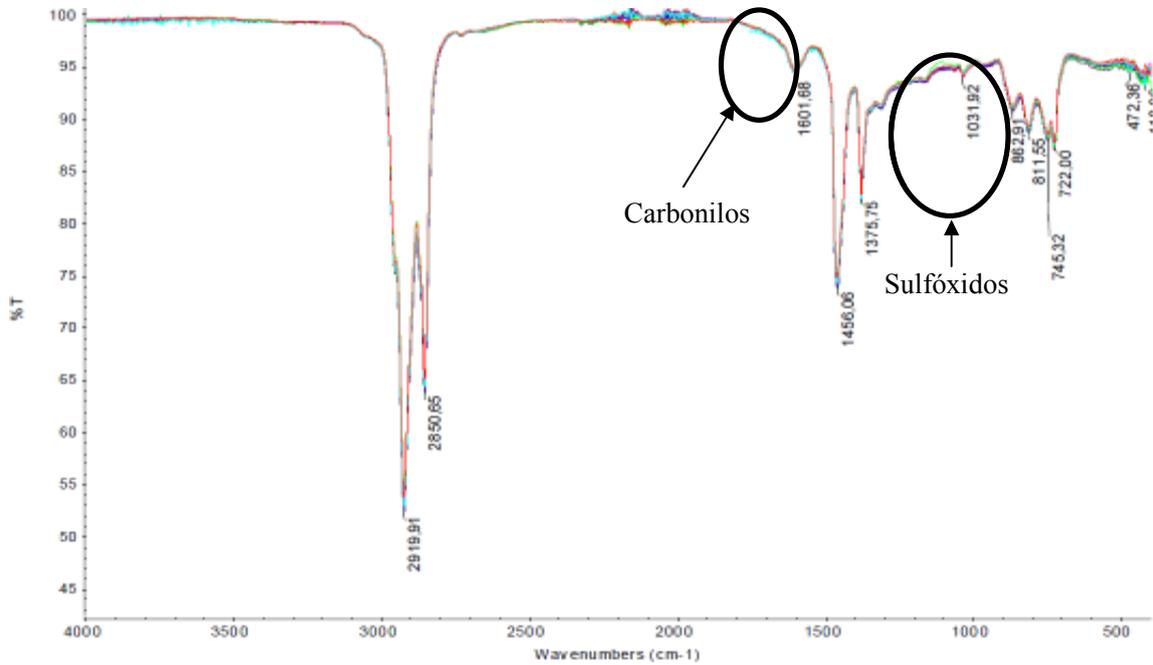


Figura 36. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas en condición original

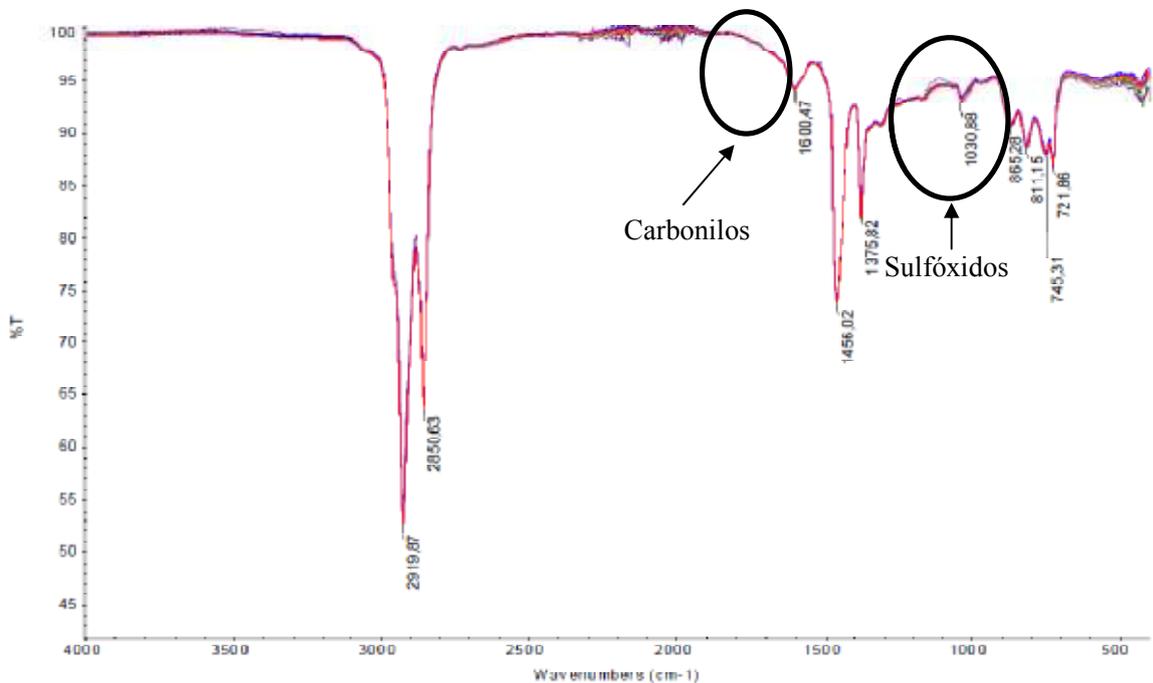


Figura 37. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionado en RTFO.

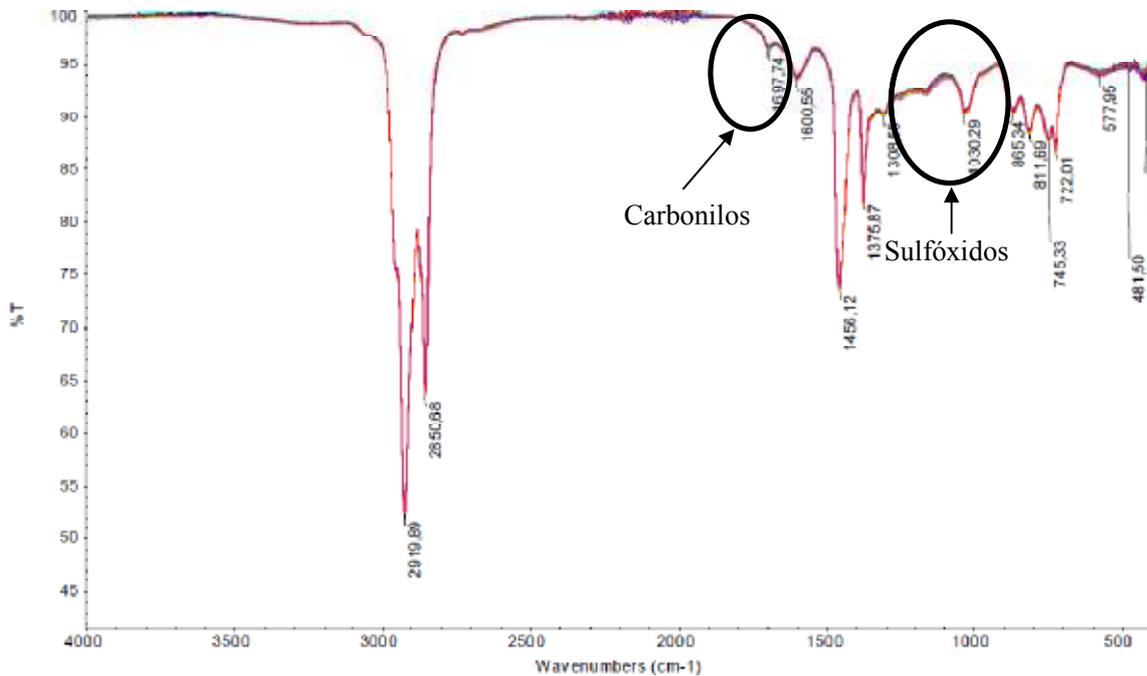


Figura 38. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas acondicionado en RTFO + PAV

Un comportamiento idéntico se percibe para las muestras que se calentaron en el recipiente de mezclado, como se aprecia en las Figuras Figura 39 y Figura 40.

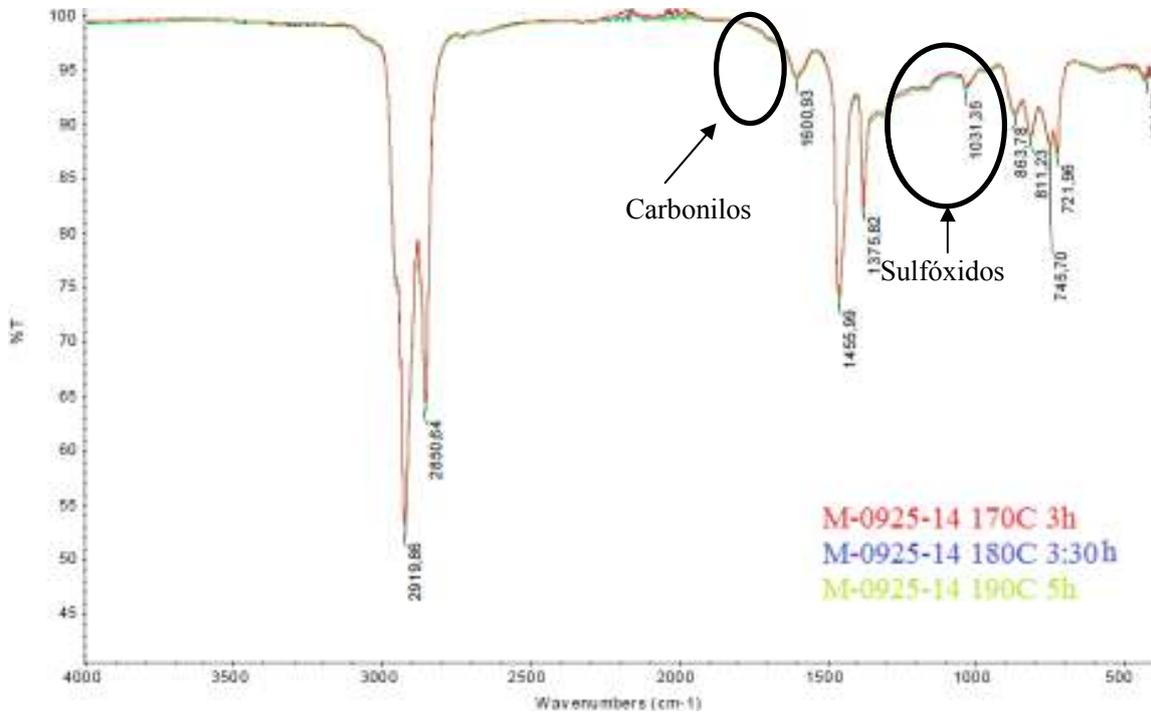


Figura 39. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el en el recipiente de mezclado a 170 °C, 180 °C y 190 °C acondicionadas en RTFO

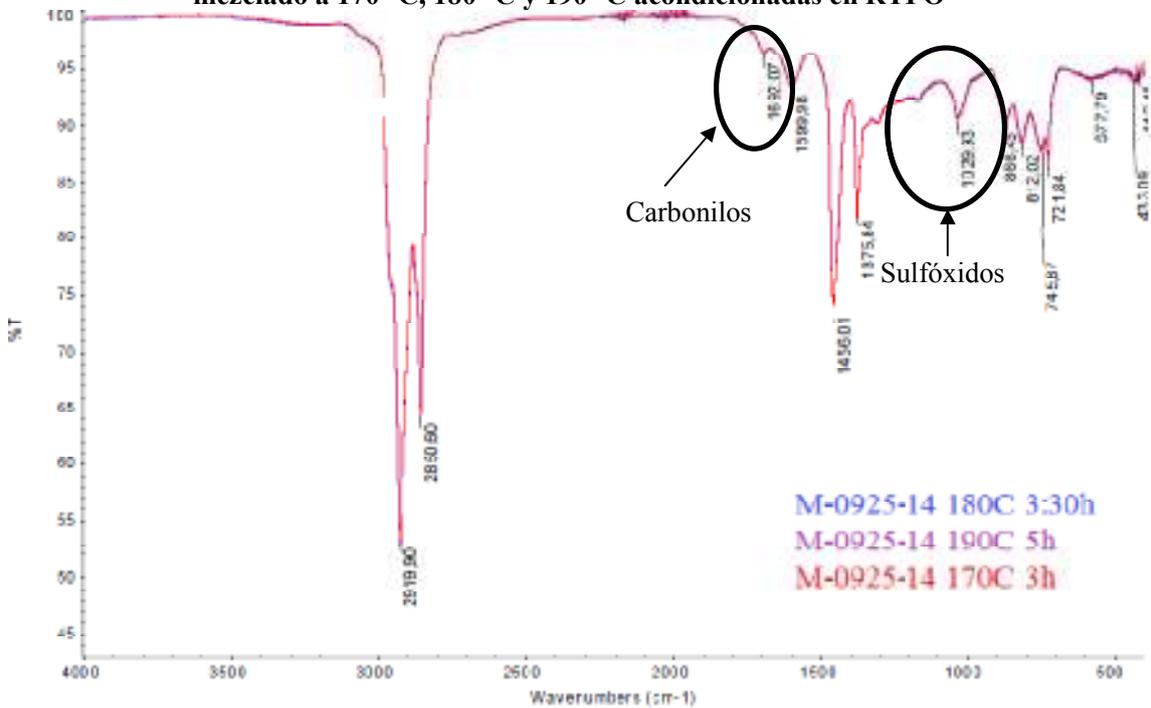


Figura 40. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el en el recipiente de mezclado a 170 °C, 180 °C y 190 °C acondicionadas en RTFO + PAV



Para descartar que el método de calentamiento influye en la señal de sulfóxidos y carbonilos se presentan los espectros de todas las muestras en estudio originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV en las Figuras

Es difícil distinguir el espectro que corresponde a cada muestra, esto refuerza la posición de que la temperatura y el tiempo de calentamiento no influyen en el aumento de la concentración de sulfóxidos y carbonilos.

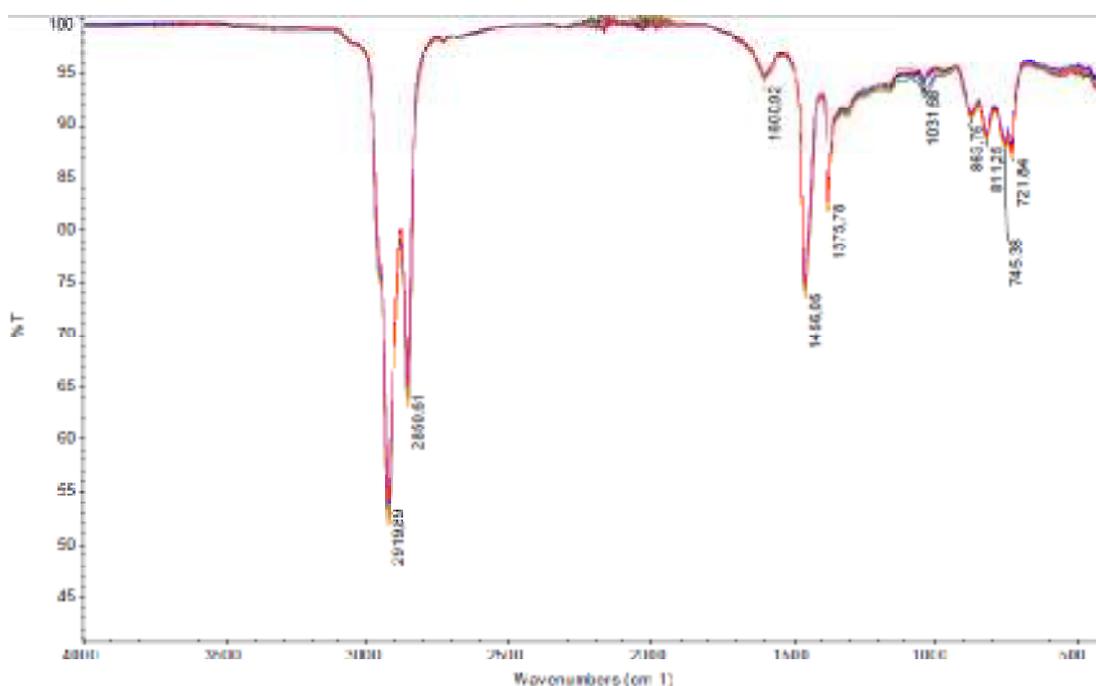


Figura 41. Comparación de los espectros de las muestras originales calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas y en el recipiente de mezclado a 170 °C, 180 °C y 190 °C

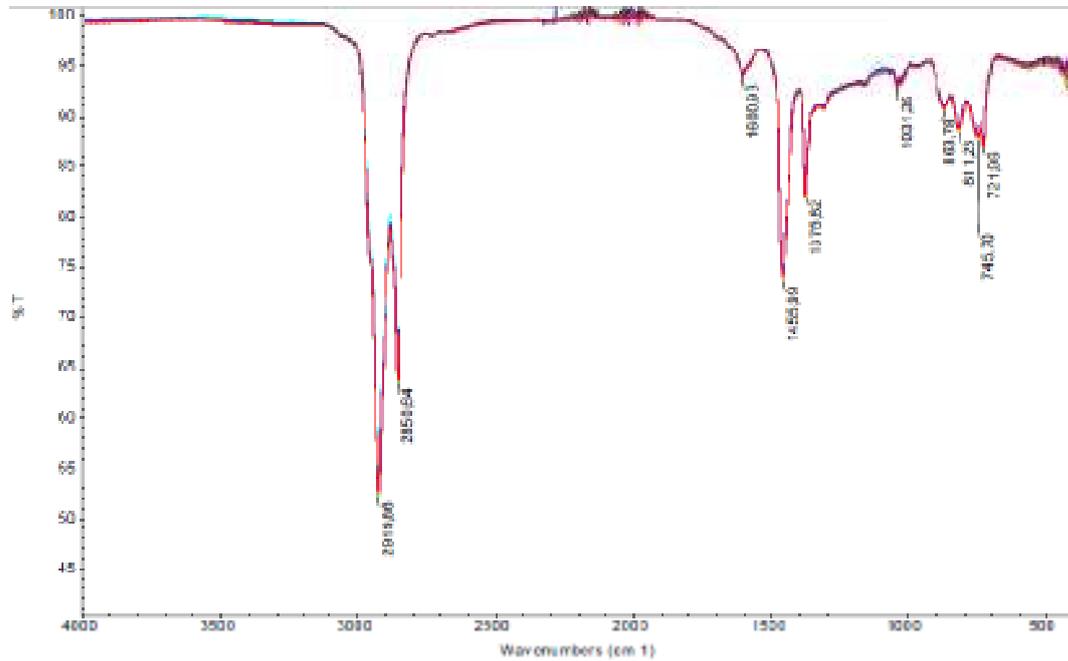


Figura 42. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas y en el recipiente de mezclado a 170 °C, 180 °C y 190 °C acondicionado en RTFO

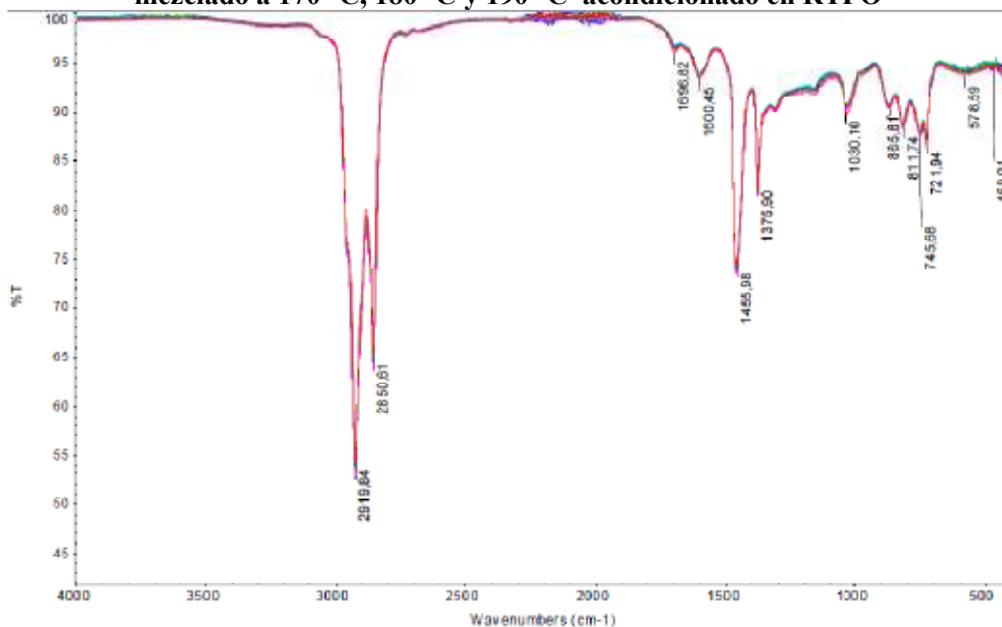


Figura 43. Comparación de los espectros de las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas y en el recipiente de mezclado a 170 °C, 180 °C y 190 °C acondicionado en RTFO + PAV



Tabla 13. Área de sulfóxidos y carbonilos para la muestra de asfalto original, después del acondicionamiento en RTFO y después del acondicionamiento en RTFO + PAV de las muestras asfalto calentadas en el horno de convección forzada y en el recipiente de mezclado

M-925-14	Sulfóxidos ($A \cdot cm^{-1}$)			Carbonilos ($A \cdot cm^{-1}$)		
	Original	RTFO	RTFO+PAV	Original	RTFO	RTFO+PAV
2h 135°C	0,112	0,186	0,768	0,029	0,065	0,121
3h 135°C	0,134	0,199	0,761	0,017	0,029	0,093
4h 135°C	0,117	0,214	0,901	0,034	0,04	0,097
2h 150°C	0,074	0,180	0,785	0,036	0,063	0,103
3h 150°C	0,087	0,183	0,829	0	0	0,106
4h 150°C	0,125	0,196	0,852	0	0,014	0,113
2h 165°C	0,069	0,205	0,805	0	0	0,109
3h 165°C	0,103	0,174	0,963	0	0	0,121
4h 165°C	0,073	0,177	0,768	0	0	0,094
3h 170°C MD	0,190	0,292	0,861	0,013	0,026	0,142
3:30h 180°C MD	0,107	0,202	0,762	0	0	0,113
5h 190°C MD	0,093	0,196	0,696	0,008	0,016	0,117
Promedio	0,107	0,200	0,813	0,011	0,021	0,111
Desv. estándar	0,034	0,031	0,074	0,014	0,024	0,014
Mínimo	0,069	0,174	0,696	0,000	0,000	0,093
Máximo	0,190	0,292	0,963	0,036	0,065	0,142

La muestra original que presenta la menor área de sulfóxidos es la calentada en el horno de convección forzada a 165 °C durante 2 horas después del RTFO es la muestra calentada a 165 °C con el mismo método pero durante 3 horas. Y en el caso de las muestras después del RTFO + PAV la que presenta la menor área es la muestra calentada en el recipiente de mezclado a 190 °C durante 5 horas. La muestra original que presenta la mayor área es la calentada en el recipiente de mezclado durante 3 horas a 170 °C. La muestra calentada a en el horno de convección forzada a 165 °C durante 3 horas después del RTFO + PAV fue la que reportó mayor área.

El coeficiente de variación disminuye conforme se adicionan acondicionamientos. Esto es un indicador del error que se introduce al cuantificar las áreas cuando las señales son muy pequeñas, ya que esto se debe hacer manualmente.



En la Figura 44 se observan gráficamente los resultados. Es evidente que el acondicionamiento RTFO + PAV es el que produce la mayor variación en el área de la señal de los sulfóxidos. Esto mismo se observa en el área de los carbonilos (Ver Figura 45), en donde en muchas muestras no reportan resultados en condición original y después del RTFO.

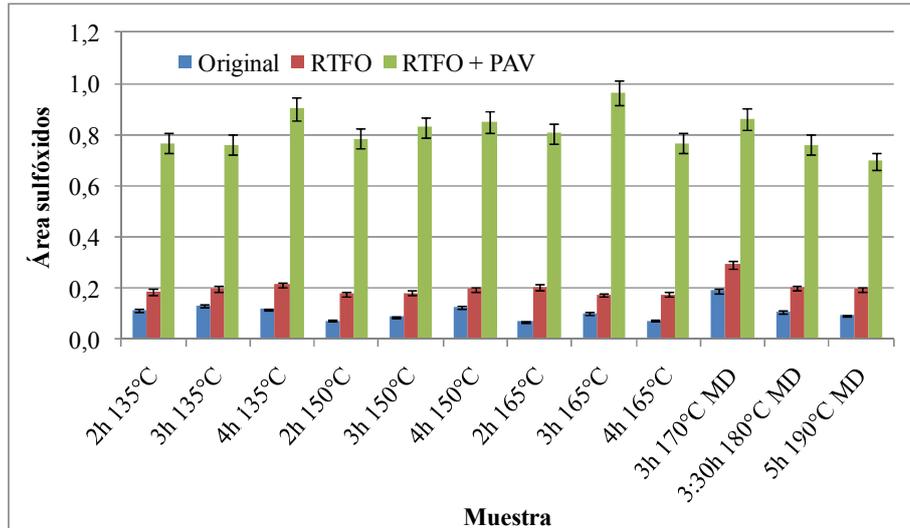


Figura 44. Comparación de las áreas de las señales de sulfóxidos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada y en el recipiente de mezclado para las muestras originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV

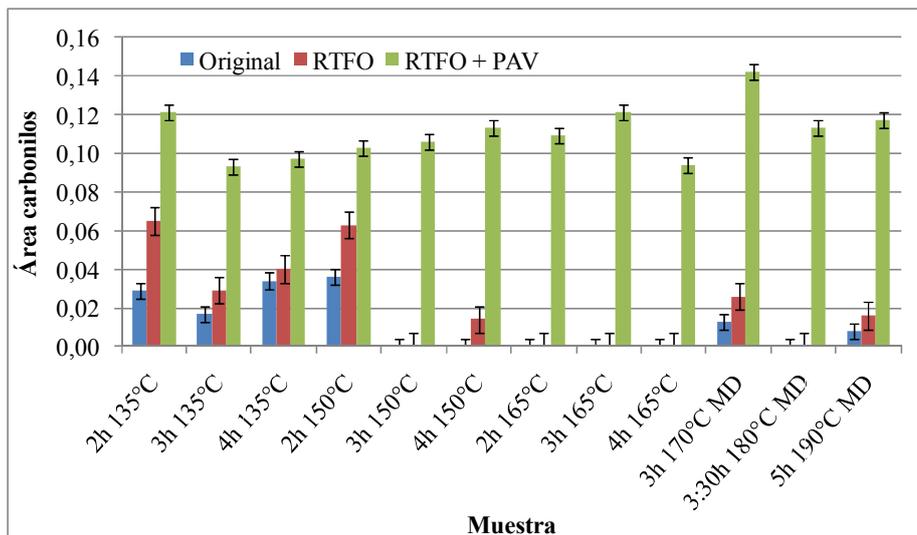


Figura 45. Comparación de las áreas de las señales de carbonilos obtenidos para los diferentes periodos de acondicionamiento en el horno de convección forzada y en el recipiente de mezclado para las muestras originales, después del RTFO y después del RTFO + PAV



El área de la señal de sulfóxidos de las muestras después del RTFO por lo menos triplica el área de las muestras originales, pero después del acondicionamiento en el PAV por lo menos se sextuplica. Las áreas después del RTFO + PAV por lo menos triplican el área después del RTFO.

Un comportamiento más diverso se obtiene con el área de la señal de carbonilos, sin embargo también es evidente que después del acondicionamiento en el PAV hay un incremento del área pero en magnitudes menores que para los sulfóxidos.

Para visualizar mejor el efecto de los acondicionamientos en el aumento de los sulfóxidos y carbonilos, se compara la variación entre cada muestra original y el RTFO, muestra RTFO y RTFO + PAV y muestra original y RTFO + PAV.

En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se presentan las diferencias de las áreas para la señal de los sulfóxidos. Es claro que el aumento de la señal es causado por el acondicionamiento en PAV, ya que la diferencia entre el área que se mide para las muestras de asfalto original y las muestras de asfalto después del RTFO es cercana a $0,100 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1}$, excepto para la muestra acondicionada en el horno de convección forzada a $165 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 2 horas.

Tabla 14. Comparación de la variación de las áreas de la señal de sulfóxidos para los diferentes acondicionamientos

M-925-14	Sulfóxidos ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-1}$)		
	Original y RTFO	RTFO y RTFO + PAV	Original y RTFO+PAV
2h 135°C	0,074	0,582	0,656
3h 135°C	0,065	0,562	0,627
4h 135°C	0,097	0,687	0,784
2h 150°C	0,106	0,605	0,711
3h 150°C	0,096	0,646	0,742
4h 150°C	0,071	0,656	0,727
2h 165°C	0,136	0,600	0,736
3h 165°C	0,071	0,789	0,860
4h 165°C	0,104	0,591	0,695
3h 170°C MD	0,102	0,569	0,671
3:30h 180°C MD	0,095	0,560	0,655
5h 190°C MD	0,103	0,500	0,603

En la Figura 46 se observa claramente el efecto del PAV en el cambio de la concentración de sulfóxidos de todas las muestras con respecto tanto las muestras originales y las muestras después del RTFO

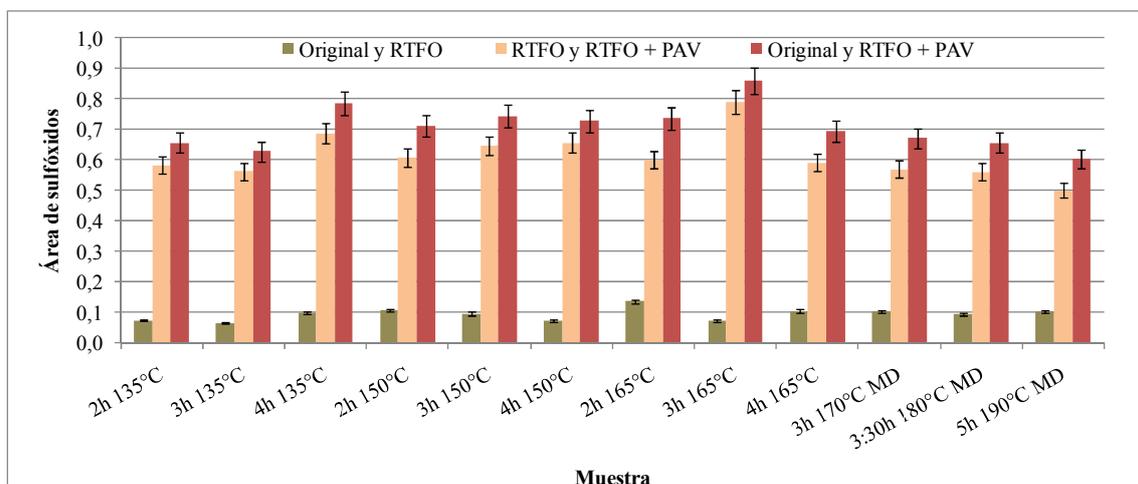


Figura 46. Comparación de la variación de las áreas de la señal de sulfóxidos para los diferentes acondicionamientos

En la Tabla 15 se presentan las diferencias de las áreas para la señal de los carbonilos. Aunque los cambios de área no tienen el mismo rango de magnitud, si se observa el mismo comportamiento, es decir el acondicionamiento en el PAV es el que incrementa la presencia de carbonilos, como se aprecia gráficamente en la Figura 47.

En el caso de los carbonilos es más evidente aún el efecto del PAV pues incluso no se detecta señal para algunas de las muestras después del RTFO.

Tabla 15. Comparación de la variación de las áreas de la señal de carbonilos para los diferentes acondicionamientos

M-925-14	Carbonilos (A·cm ⁻¹)		
	Original y RTFO	RTFO y RTFO + PAV	Original y RTFO+PAV
2h 135°C	0,036	0,056	0,092
3h 135°C	0,012	0,064	0,076
4h 135°C	0,006	0,057	0,063
2h 150°C	0,027	0,04	0,067
3h 150°C	0,000	0,106	0,106
4h 150°C	0,014	0,099	0,113
2h 165°C	0,000	0,109	0,109
3h 165°C	0,000	0,121	0,121
4h 165°C	0,000	0,094	0,094
3h 170°C MD	0,013	0,116	0,129
3:30h 180°C MD	0,000	0,113	0,113
5h 190°C MD	0,008	0,101	0,109

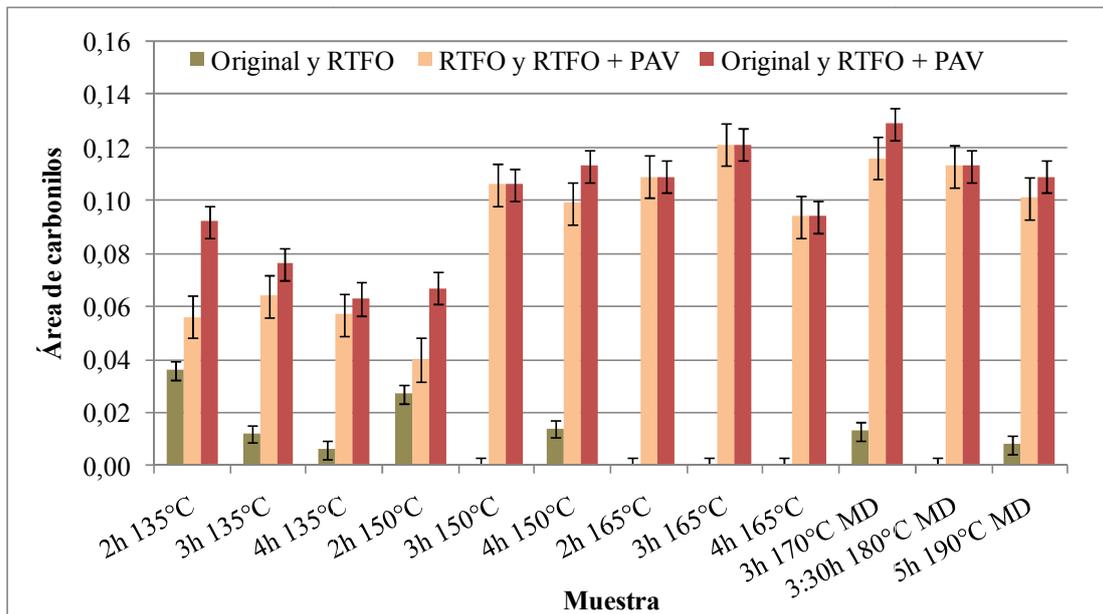


Figura 47. Comparación de la variación de las áreas de la señal de carbonilos los diferentes acondicionamientos

Los resultados obtenidos demuestran que la temperatura y los periodos de calentamiento no son los principales factores que contribuyen a la formación de los grupos funcionales relacionados con la oxidación.

2.3.2 Medición de parámetros reológicos relacionados con la susceptibilidad a la deformación y a la fatiga

Con el objetivo de determinar el efecto en el desempeño de la exposición a la temperatura durante los distintos periodos de calentamiento mediante el horno de convección forzada y el recipiente de mezclado, así como el efecto de los acondicionamientos, se miden variables reológicas ampliamente conocidas utilizadas en la clasificación de grado de desempeño.

Una de estas variables permite determinar la susceptibilidad del asfalto a la deformación permanente mediante la relación entre el módulo complejo y el ángulo de fase a la temperatura superior. De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 2, la temperatura superior del asfalto es de 64 °C, por lo que las mediciones para evaluar el cambio en el comportamiento del asfalto original con respecto a la deformación se realizan a 64 °C, 70 °C y 76 °C, pues se espera que el asfalto se vuelva más rígido conforme aumenta la temperatura.



Tabla 16. Resultados de módulo complejo, ángulo de fase y parámetro relacionado con la susceptibilidad a la deformación antes del acondicionamiento en el RTFO

Temperatura de medición (°C)	64	70	76	64	70	76	64	70	76
Parámetro	Módulo complejo (kPa)			Ángulo de fase, δ (°)			$ G^* /\text{sen}(\delta)$ (kPa)		
Condición de la muestra									
925-14 2h 135 °C	3,23	1,42	0,67	84,91	86,61	87,85	3,25	1,43	0,67
925-14 3h 135 °C	2,26	1,02	0,50	86,01	87,32	88,32	2,26	1,03	0,50
925-14 4h 135 °C	2,04	0,93	0,46	86,24	87,52	88,48	2,04	0,93	0,46
925-14 2h 150 °C	2,13	0,98	0,46	85,62	86,89	88,33	2,14	0,99	0,45
925-14 3h 150 °C	2,52	1,14	0,56	85,25	86,65	87,84	2,53	1,15	0,56
925-14 4h 150 °C	2,24	1,02	0,51	85,40	86,64	87,73	2,25	1,02	0,51
925-14 2h 165 °C	2,01	0,93	0,47	85,65	86,88	87,93	2,02	0,93	0,47
925-14 3h 165 °C	2,25	1,04	0,49	85,54	86,82	87,90	2,25	1,04	0,49
925-14 4h 165 °C	2,26	1,04	0,48	85,63	86,99	88,15	2,27	1,04	0,48
925-14 3h M 170 °C	2,85	1,28	0,61	84,98	86,54	87,76	2,86	1,29	0,62
925-14 3:30h M 180 °C	2,60	1,19	0,58	84,97	86,39	87,57	2,61	1,19	0,58
925-14 5h M 190 °C	2,94	1,34	0,64	84,31	85,88	87,17	2,95	1,34	0,64

Como se aprecia, no se puede determinar el efecto de la temperatura y del tiempo de calentamiento en la clasificación por Grado de Desempeño. En la Figura 49 se comparan gráficamente los resultados. Como se observa los resultados para las muestras calentadas a 165 °C durante 2 horas y la calentada a 135 °C durante 4 horas coinciden y presentan los valores más bajos. El valor más alto se obtiene para la muestra calentada a 135 °C durante 2 horas y la segunda muestra que presenta los resultados más altos corresponden a la muestra calentado durante 5 horas a 190 °C en el recipiente de mezclado.

En la Figura 48 se observa como los resultados muestran un comportamiento similar con un valor de $G^*/\text{seno}(\delta)$ superior a 1kPa a 70 °C, que disminuye y después se a 150 °C, se mantiene relativamente constante a 165 °C. El valor se incrementa y mantiene relativamente constante durante el acondicionamiento en el recipiente de mezclado a las tres temperaturas de estudio.

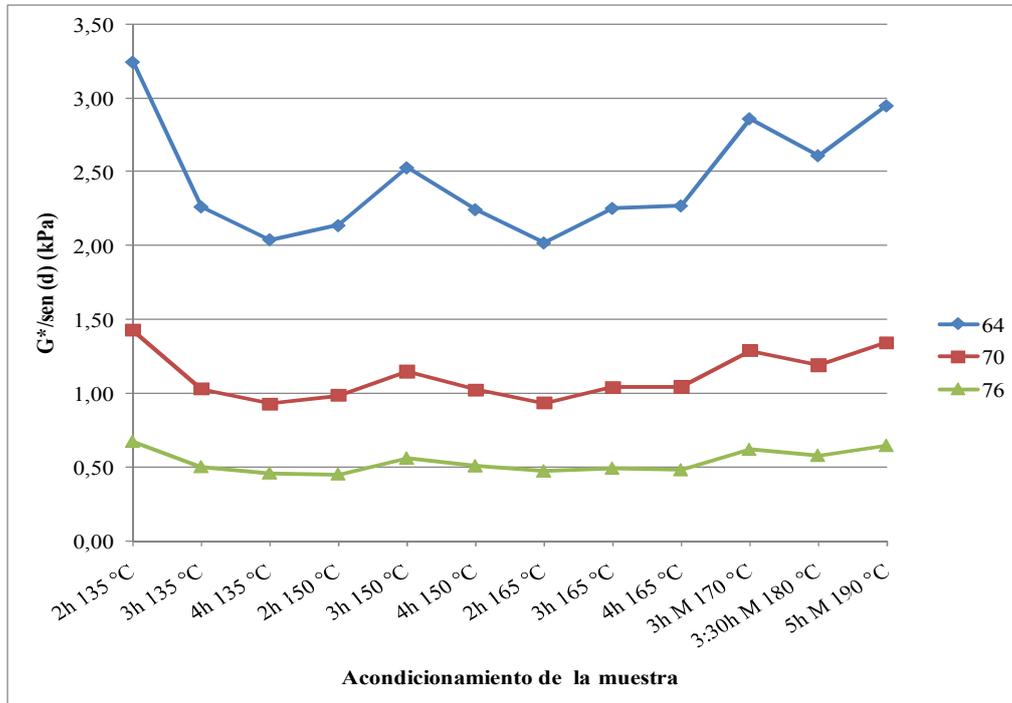


Figura 48. Comparación de los resultados de $G^*/sen(\delta)$ para todas las muestras antes de los acondicionamientos en el RTFO

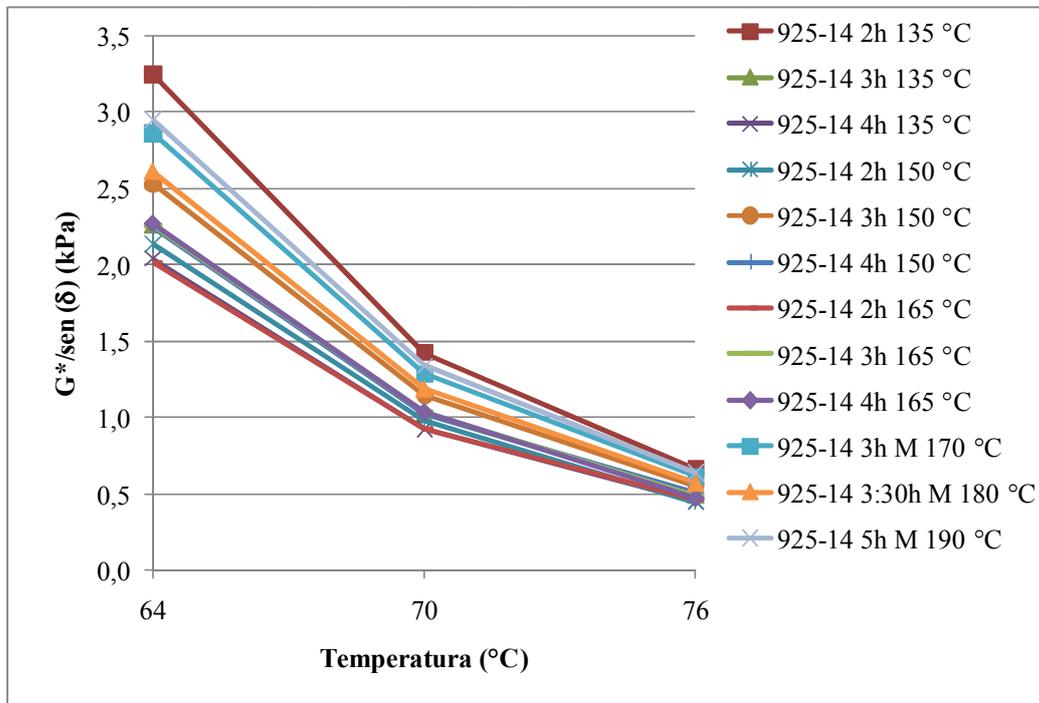


Figura 49. Comparación del parámetro de deformación de todas las muestras antes de los acondicionamientos en el RTFO



En la Figura 50 es más sencillo determinar que todas las muestras cumplen ampliamente con el requisito de tener un valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ superior a 1,0 kPa a 64 °C.

Uno de los efectos del calentamiento del asfalto es la aceleración de la pérdida de volátiles que provoca rigidización del material. Esto implica que se espera que las muestras expuestas a alta temperatura por periodos extendidos sean las que produzcan valores de $G^*/\text{sen}(\delta)$ mayores, lo cual se cumple para las muestras calentadas en el recipiente de mezclado. No obstante la muestra calentada en el horno de convección forzada durante 2 horas a 135 °C es la que reporta los mayores valores.

En contraposición, los resultados más bajos se obtienen para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 2 horas a 165 °C y durante 4 horas a 135 °C.

Para analizar los resultados más claramente se grafican agrupados por temperatura y por periodo de calentamiento. Se conserva la escala de $G^*/\text{sen}(\delta)$ desde (0 a 3,5) kPa para comparar bajo las mismas condiciones todas las muestras y visualizar el efecto de las condiciones de análisis.

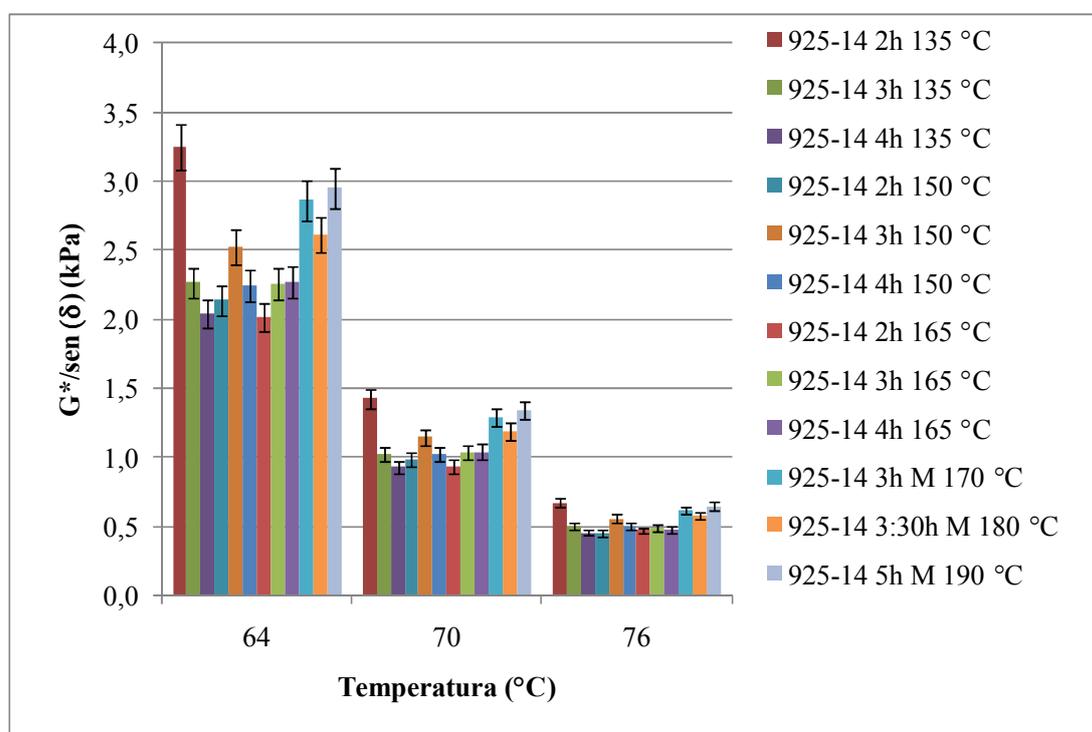


Figura 50. Comparación del parámetro de deformación de todas las muestras antes de los acondicionamientos en el RTFO

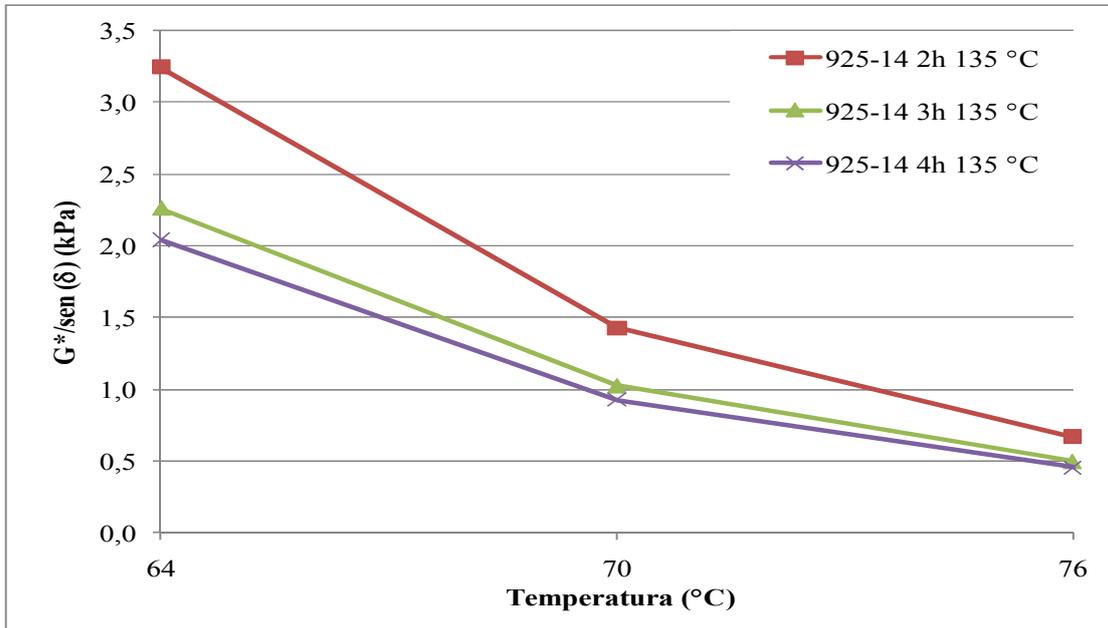


Figura 51. Comparación del parámetro de deformación para la temperatura de 135 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas

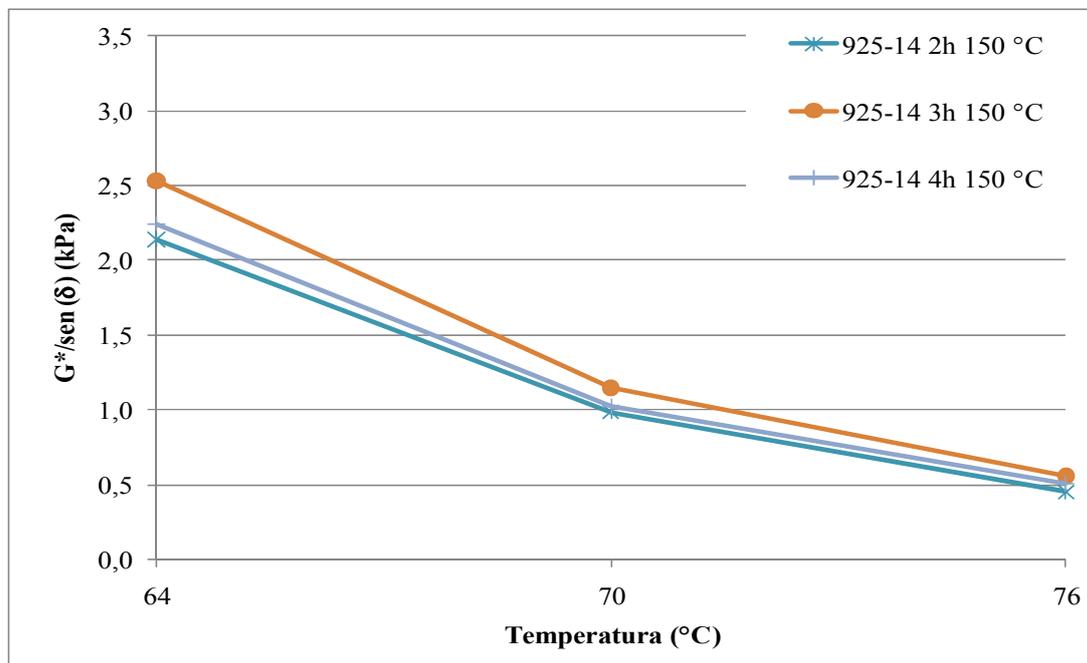


Figura 52. Comparación del parámetro de deformación para la temperatura de 150 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas

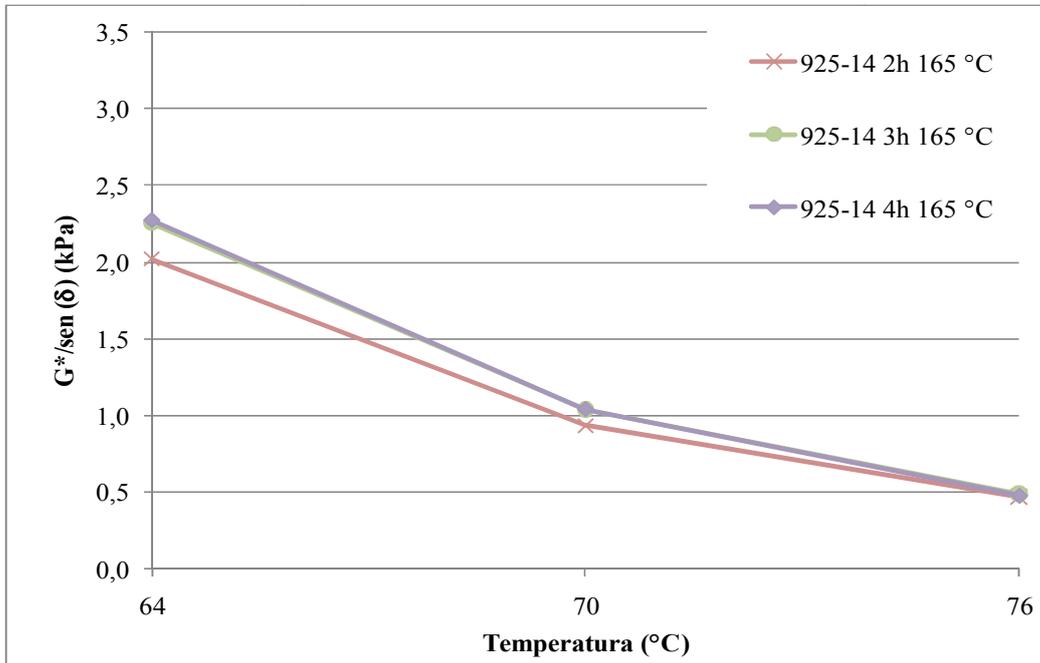


Figura 53. Comparación del parámetro de deformación para la temperatura de 165 °C a 2 horas, 3 horas y 4 horas

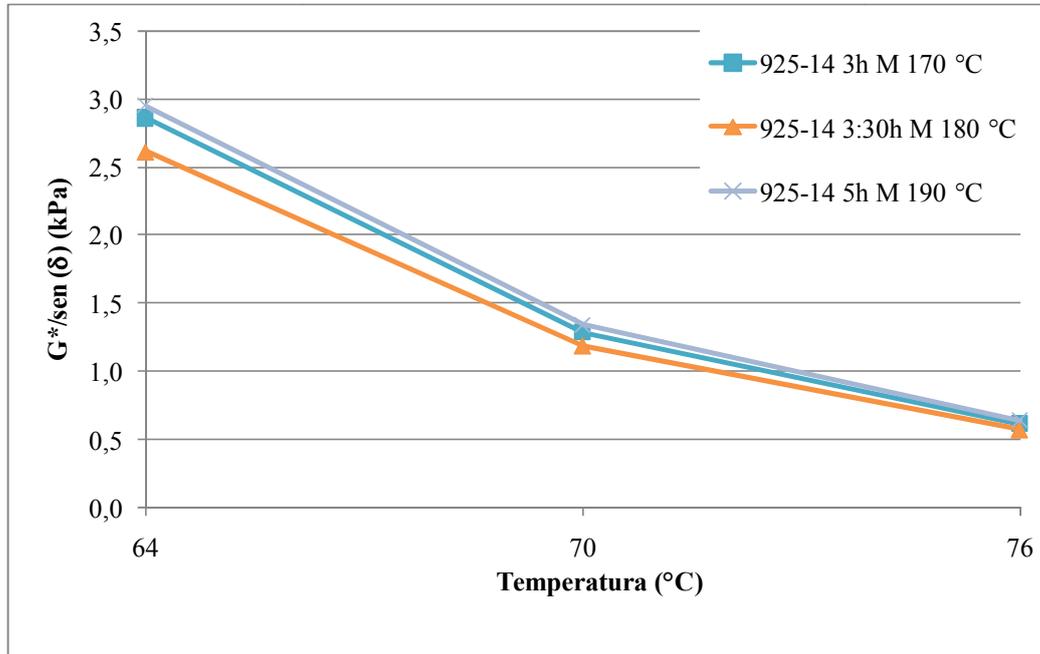


Figura 54. Comparación del parámetro de deformación para las muestras preparadas en el recipiente de mezclado

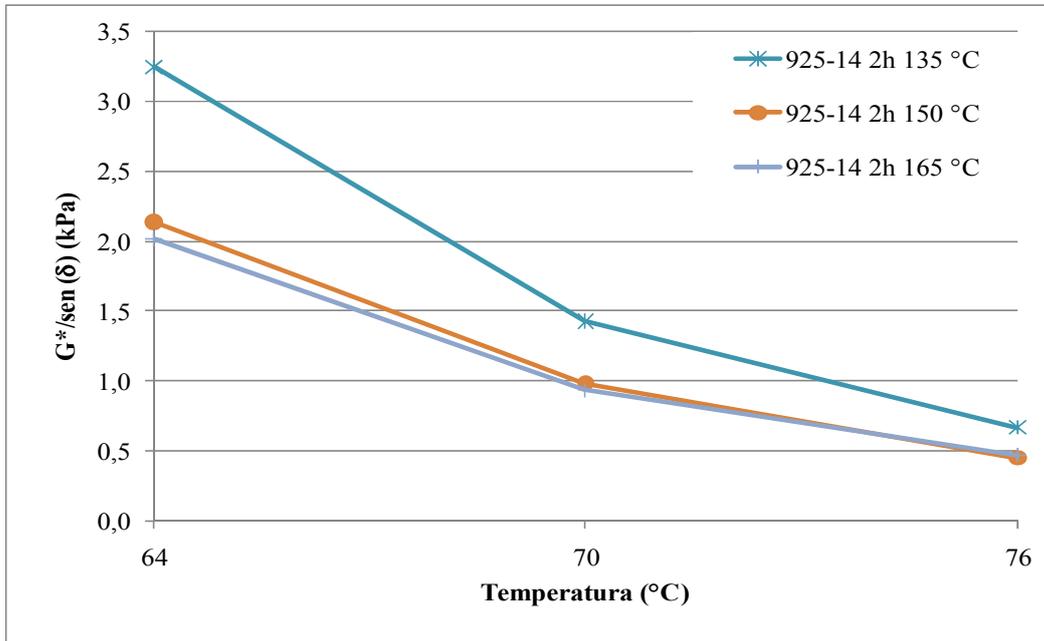


Figura 55. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 2 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C

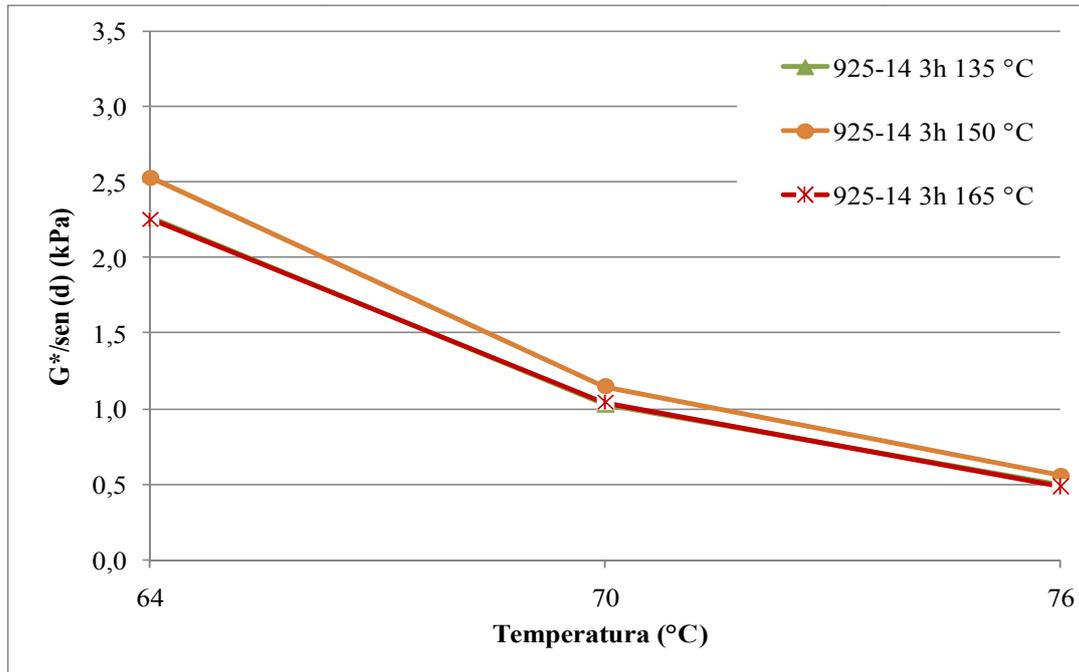


Figura 56. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 3 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C

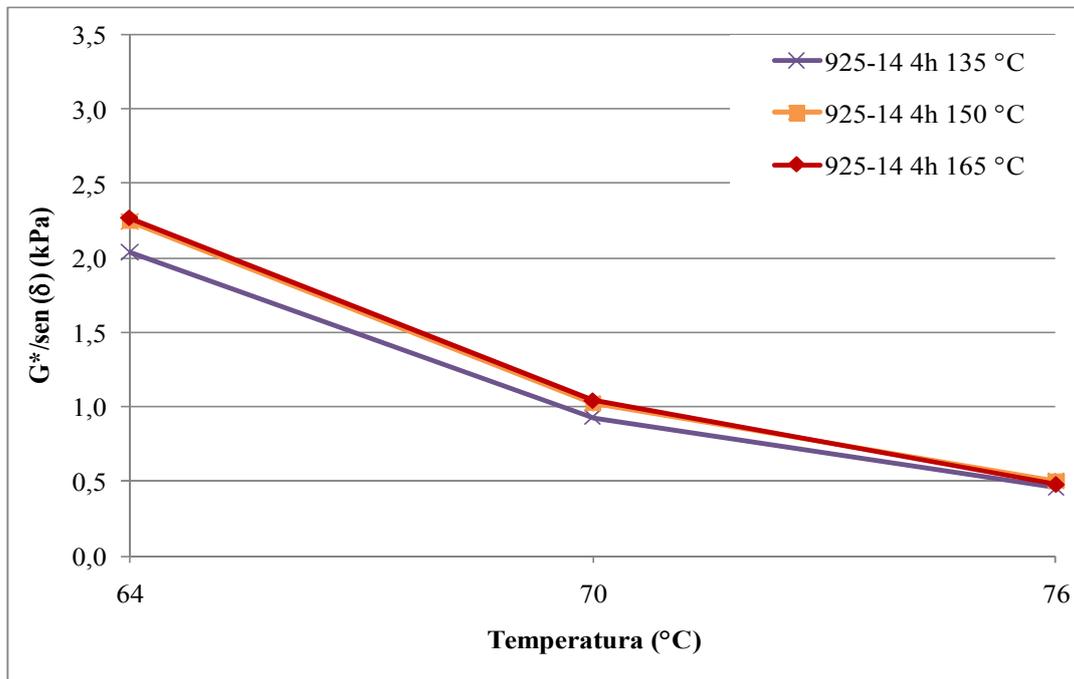


Figura 57. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 4 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C

De cada uno de las condiciones graficadas se seleccionan las muestras que reportan un parámetro de deformación cercano a 2,0 kPa a 64 °C que es el valor mínimo obtenido. Se selecciona la temperatura de 64 °C, pues según el mapa de PG presentado en la Propuesta de Asfaltos para Costa Rica (Elizondo-Arrieta, Aguiar-Moya, Rodríguez-Castro, & Loría-Salazar, 2012), la temperatura superior del pavimento en la mayoría del territorio nacional es de 64 °C y de acuerdo con la nueva normativa de Grado de Desempeño, se debe evaluar el material a la temperatura del proyecto.

Es importante mencionar que entre mayor sea este parámetro mejor será su respuesta a la deformación, pues los valores menores a 1,0 kPa sugieren susceptibilidad a la deformación. Las muestras que se grafican en la Figura 58. En los tres casos se incumple con el parámetro de especificación a 70 °C, lo que no sucede para ninguna de las otras muestras de estudio.

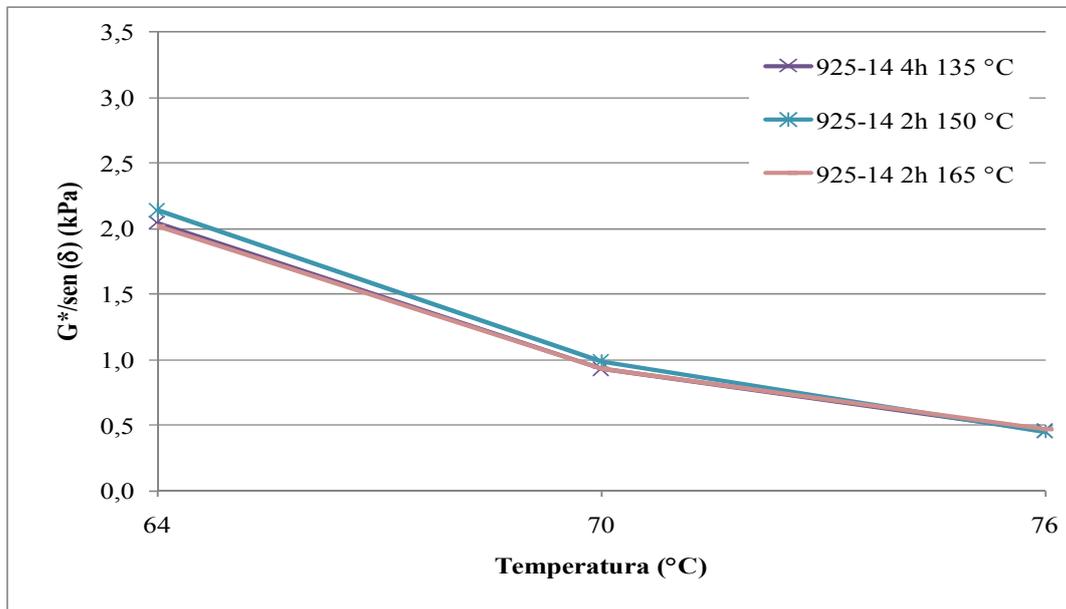


Figura 58. Muestras que reportan los valores de $G^*/\text{sen}(\delta)$ más bajos

Las muestras que reportan valores más altos de $G^*/\text{sen}(\delta)$ se presentan en la Figura 59. Entre ellas están las tres muestras calentadas en el recipiente de mezclado y dos de las calentadas en el horno de convección forzada, pero no las preparadas a la temperatura mayor ni durante los mayores periodos.

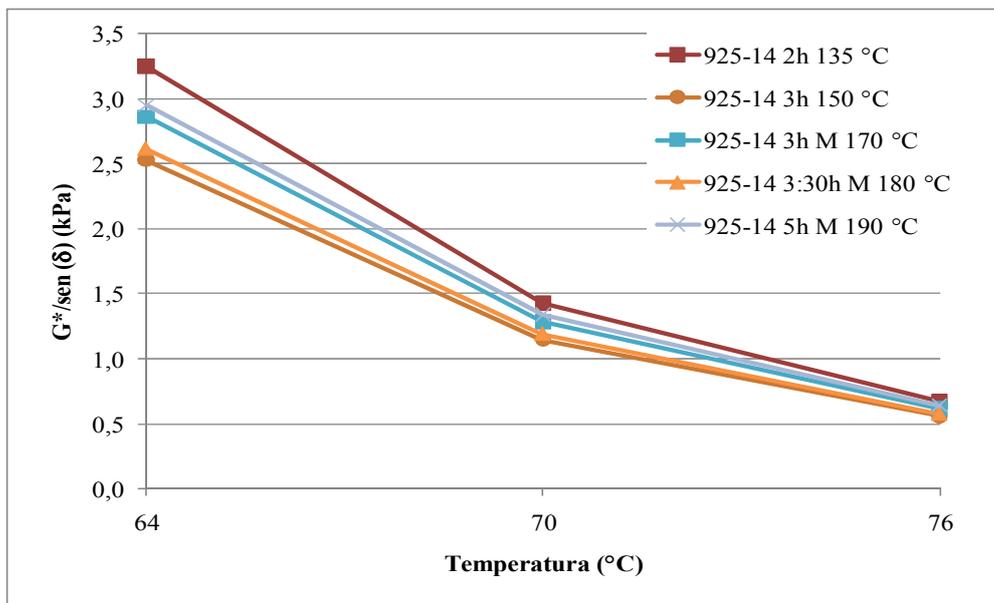


Figura 59. Muestras que reportan los valores de $G^*/\text{sen}(\delta)$ más altos



Para corroborar la baja susceptibilidad a la temperatura superior, se evalúa $G^*/\text{sen}(\delta)$ de las muestras después del acondicionamiento en el RTFO, tal como lo establece la normativa de referencia. En la Tabla 17 se resumen los resultados numéricos.

Tabla 17. Resultados de módulo complejo, ángulo de fase y parámetro relacionado con la susceptibilidad a la deformación después del acondicionamiento en el RTFO

Temperatura de medición (°C)	64	70	76	64	70	76	64	70	76
Parámetro	Módulo complejo (kPa)			Ángulo de fase, δ (°)			$ G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)		
Condición de la muestra									
925-14 2h 135 °C	4,36	1,95	0,92	82,73	84,67	86,62	4,39	1,96	0,93
925-14 3h 135 °C	4,58	1,99	0,94	82,38	84,26	85,69	4,62	2,00	0,94
925-14 4h 135 °C	4,55	2,00	0,95	82,23	84,10	85,58	4,59	2,01	0,95
925-14 2h 150 °C	5,33	2,34	1,06	81,92	83,94	86,33	5,38	2,36	1,11
925-14 3h 150 °C	5,78	2,53	1,16	81,66	83,73	85,36	5,84	2,54	1,17
925-14 4h 150 °C	5,83	2,51	1,16	81,60	83,71	85,34	5,89	2,53	1,17
925-14 2h 165 °C	5,24	2,28	1,00	81,86	83,84	85,82	5,30	2,29	1,07
925-14 3h 165 °C	4,47	1,97	0,94	82,36	84,27	85,75	4,47	1,97	0,94
925-14 4h 165 °C	4,77	2,09	1,01	82,14	84,17	85,87	4,81	2,10	1,01
925-14 3h M 170 °C	5,38	2,40	1,14	81,17	83,26	84,90	5,45	2,41	1,15
925-14 3:30h M 180 °C	5,87	2,60	1,22	81,09	83,29	85,09	5,94	2,62	1,22
925-14 5h M 190 °C	7,03	3,09	1,42	80,09	82,51	84,44	7,14	3,12	1,42

El parámetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ para las muestras después del acondicionamiento en el RTFO debe tener un valor mínimo de 2,2 kPa. Todas las muestras cumplen con el requisito a 64 °C pero hay varias muestras que también lo cumplen a 70 °C.

En la Figura 60 se observa un comportamiento particular, ya que después de los periodos de calentamiento a 135 °C, aumenta conforme se incrementa el tiempo de calentamiento a 150 °C, pero se reduce conforme se aumenta el tiempo de calentamiento a 165 °C, excepto a 165 °C durante 4 horas, donde se inicia un incremento conforme se aumenta la temperatura en el recipiente de mezclado.

Al igual que en la Figura 48, el comportamiento se atenúa conforme aumenta la temperatura de ensayo.

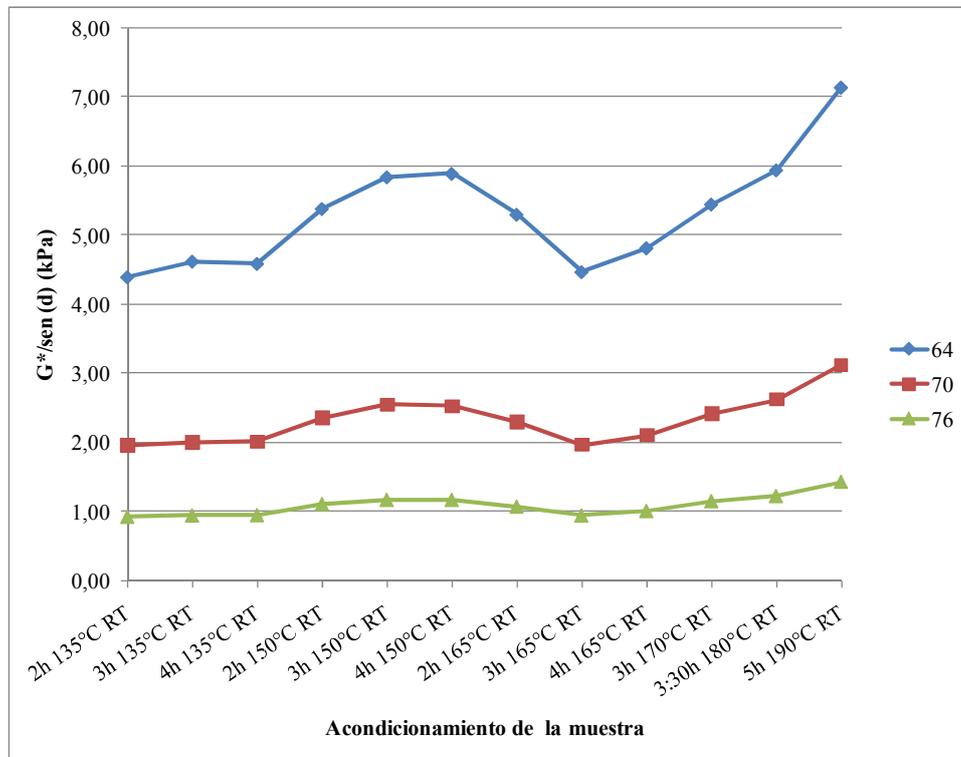


Figura 60. Comparación de los resultados de $G^*/\text{sen}(\delta)$ para todas las muestras después del acondicionamiento en el RTFO

En las Figuras Figura 61 y Figura 62 es fácil determinar que la muestra calentada en el recipiente de mezclado a 190 °C durante 5 horas es la que tiene el mayor valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$, pero es difícil identificar cuáles muestras tienen los resultados más bajos, para esto se grafican las muestras agrupadas por periodo de calentamiento y por temperatura.

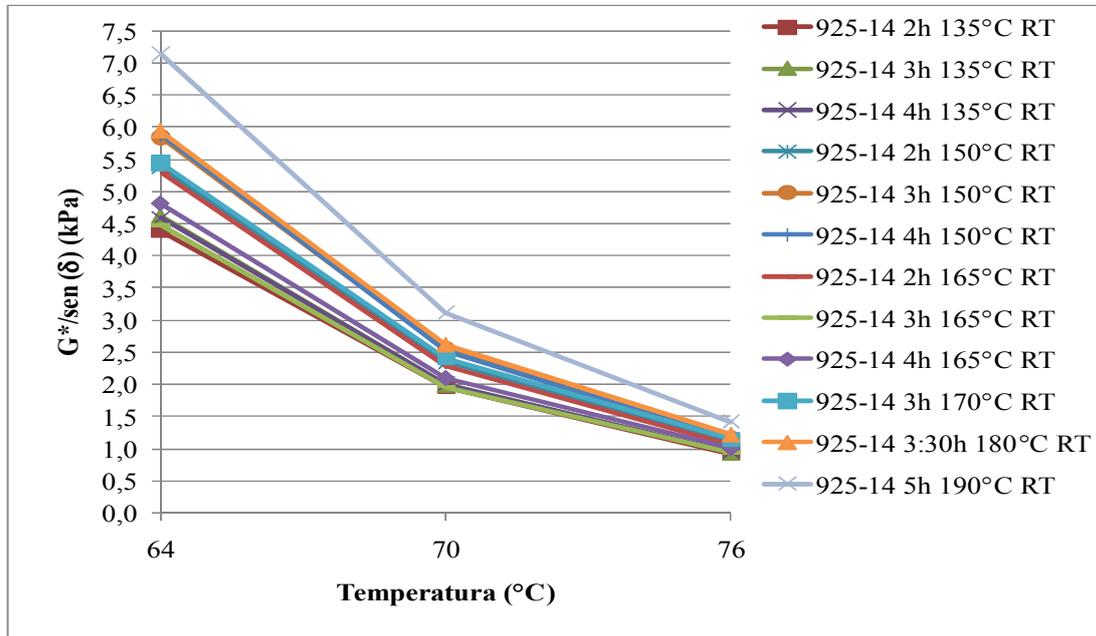


Figura 61. Resultados del parámetro de la deformación para todas las muestras después del acondicionamiento en RTFO

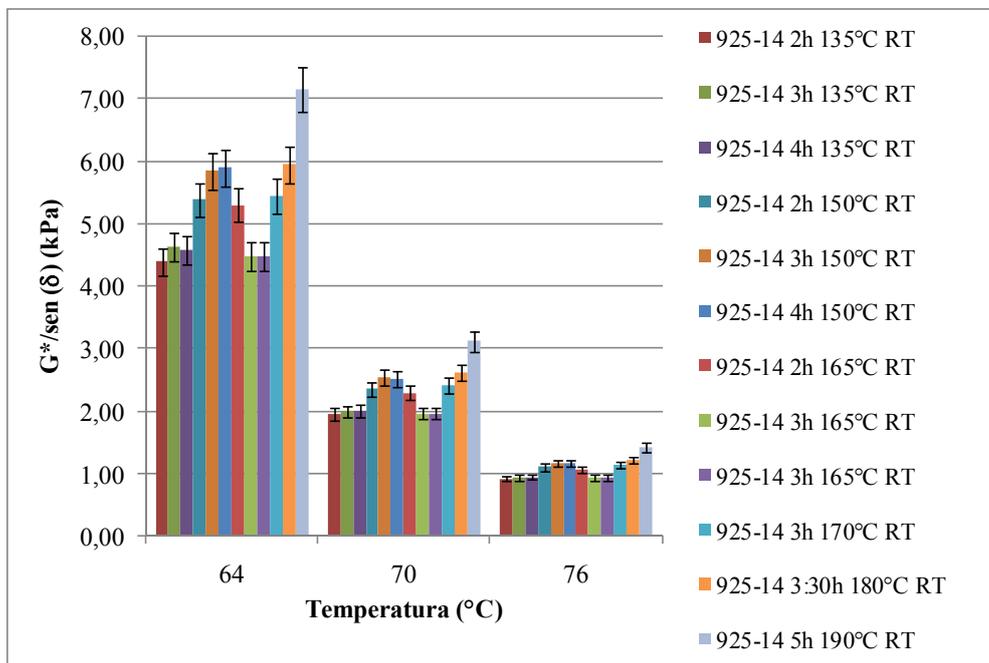


Figura 62. Comparación del parámetro de deformación de todas las muestras después del acondicionamiento en el RTFO

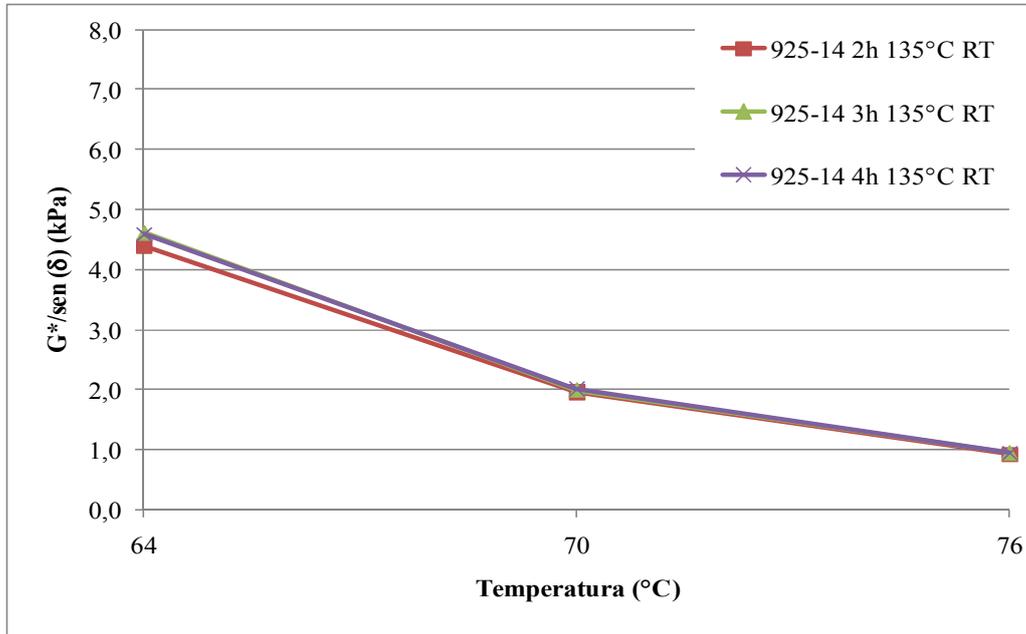


Figura 63. Comparación del parámetro de deformación para la temperatura de 135 °C durante 2 horas, 3 horas y 4 horas después del acondicionamiento en el RTFO

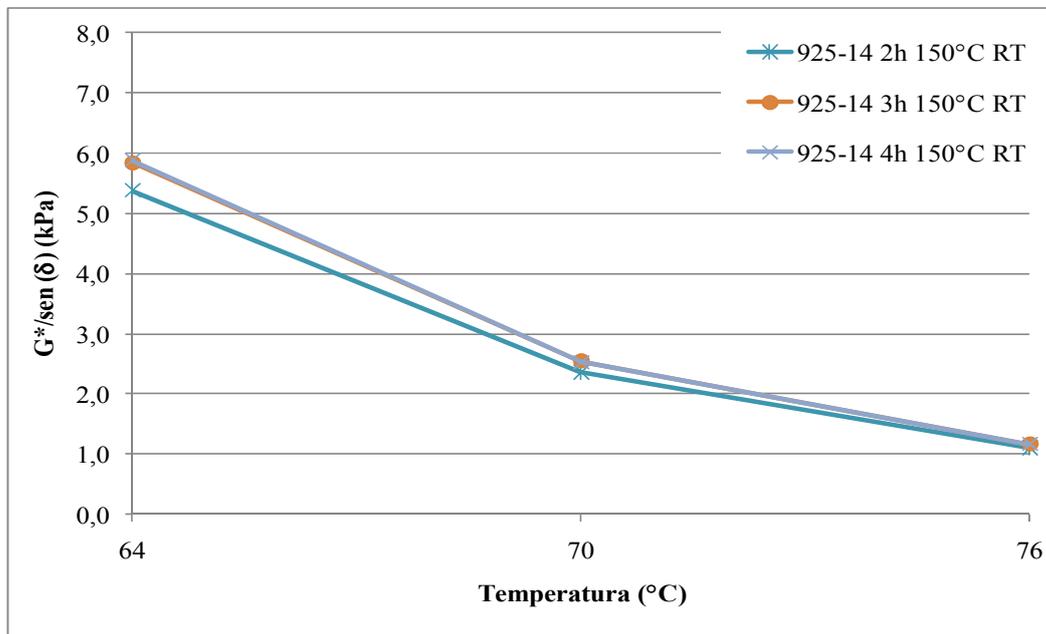


Figura 64. Comparación del parámetro de deformación para la temperatura de 150 °C durante 2 horas, 3 horas y 4 horas después del acondicionamiento en el RTFO

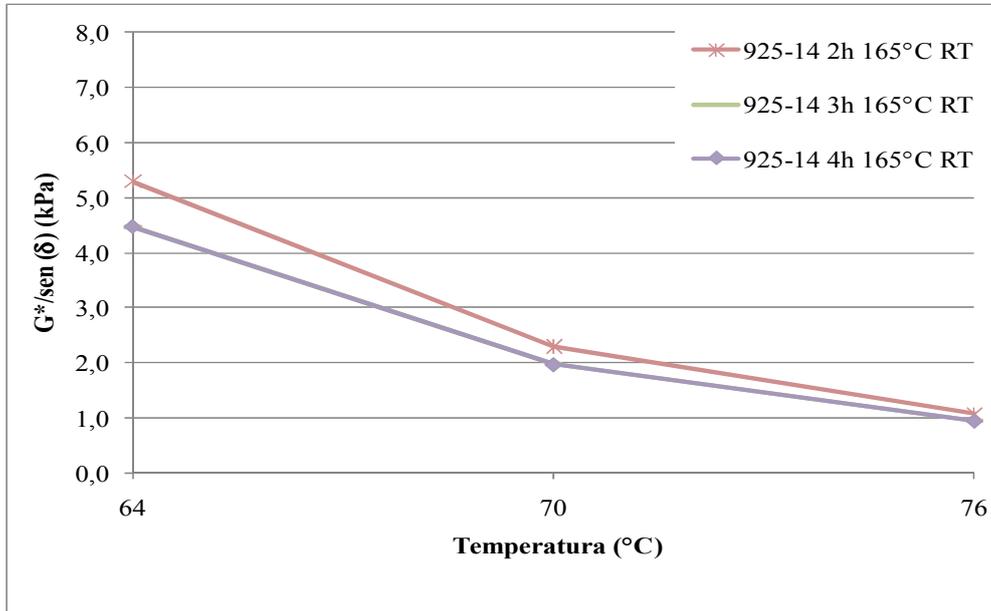


Figura 65. Comparación del parámetro de deformación para la temperatura de 165 °C durante 2 horas, 3 horas y 4 horas después del acondicionamiento en el RTFO

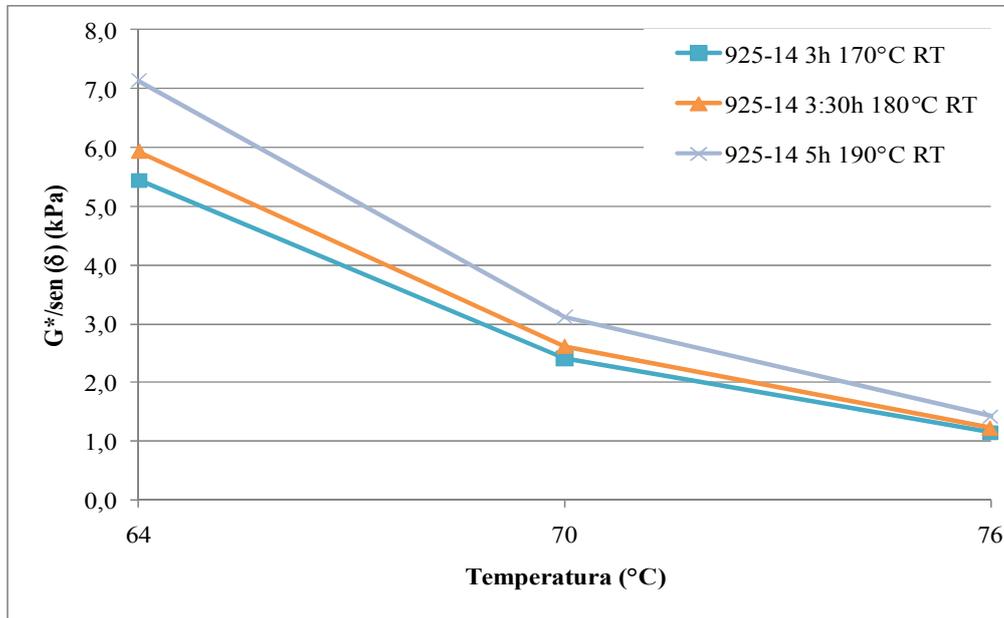


Figura 66. Comparación del parámetro de deformación para las muestras preparadas en el recipiente de mezclado después del acondicionamiento en el RTFO



Al comparar los resultados se observa como las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 150 °C y las que se calentaron en el recipiente de mezclado reportan resultados de $G^*/\text{sen}(\delta)$ mayores a las otras muestras.

En el caso de las muestras calentadas en el horno de convección forzada el comportamiento esperado es que a 165 °C los resultados superaran las que se acondicionaron a 150 °C.

En las figuras siguientes se comparan las muestras tomando como referencia el periodo. Para el periodo de calentamiento de 2 horas, la diferencia entre las muestras calentadas a 150 y 165 °C es casi despreciable (Ver Figura 67). Pero los resultados de las muestras calentadas a 150 °C, superan a las muestras calentadas a 165 °C para los periodos de 3 horas y 4 horas. La diferencia entre los resultados entre las muestras calentadas a 135 °C y 165 °C es casi despreciable (Ver Figuras Figura 68 y Figura 69).

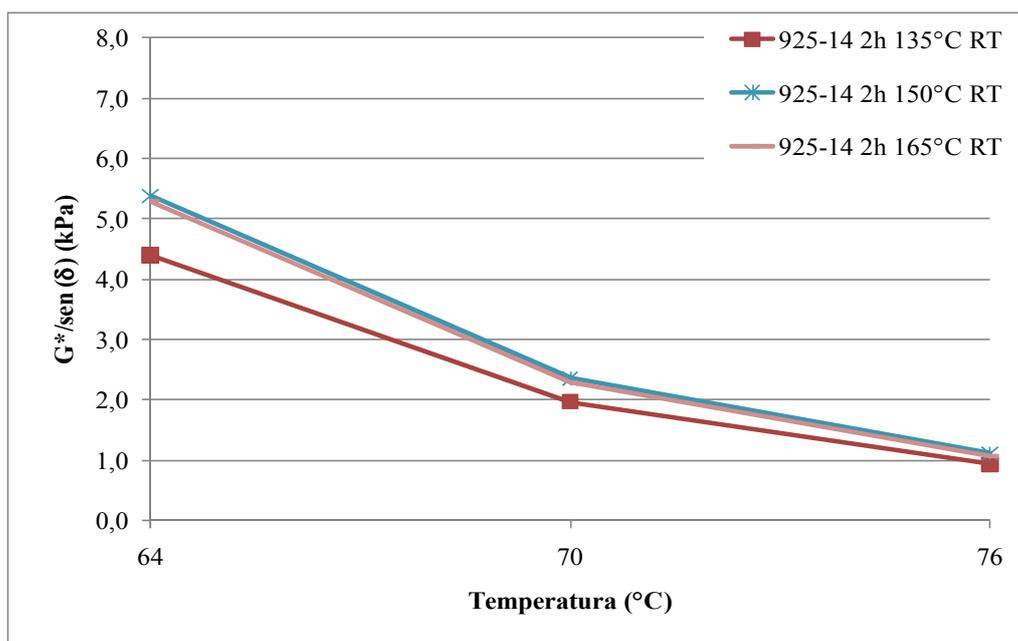


Figura 67. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 2 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C después del RTFO

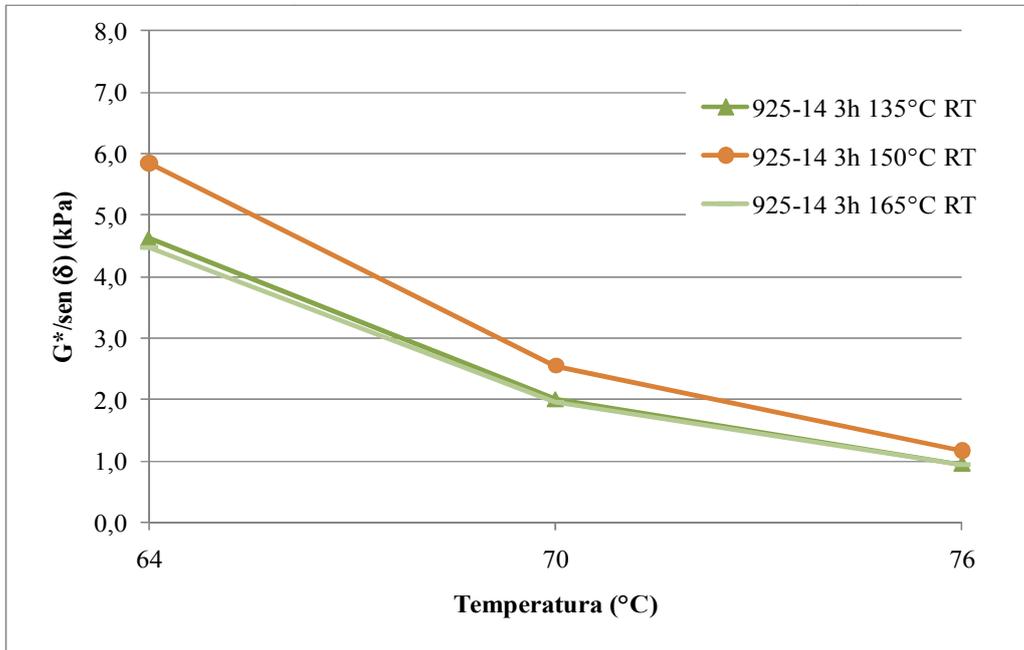


Figura 68. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 3 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C después del RTFO

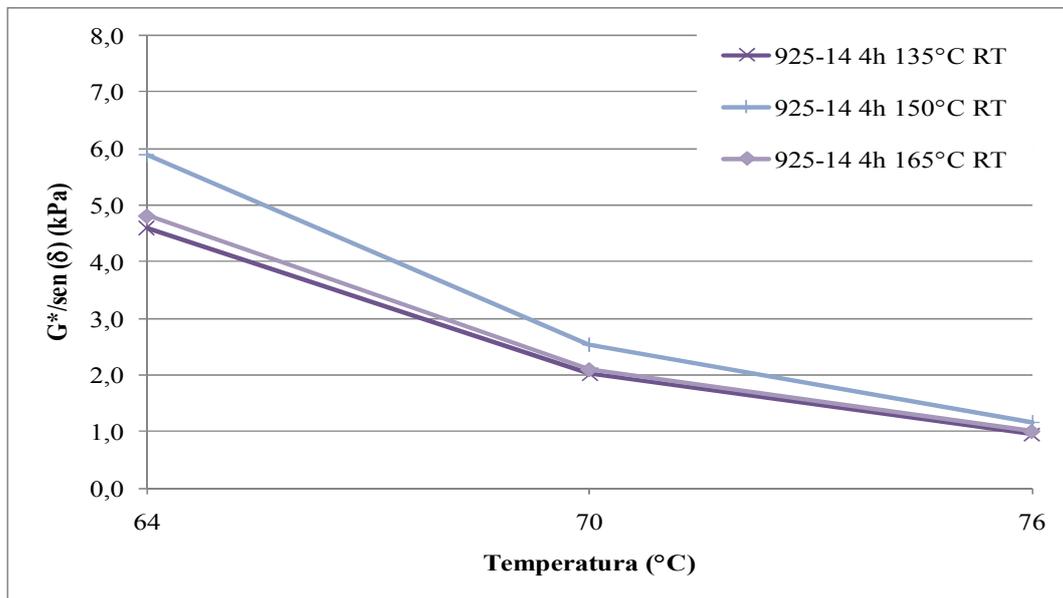


Figura 69. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 4 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C después del RTFO



Al igual que en el caso anterior, se comparan las muestras que presentan menor susceptibilidad a la deformación tomando los valores mayores a 5,5 kPa y posteriormente las muestras que demuestran menor susceptibilidad a la deformación tomando los valores menores a 4,5 kPa.

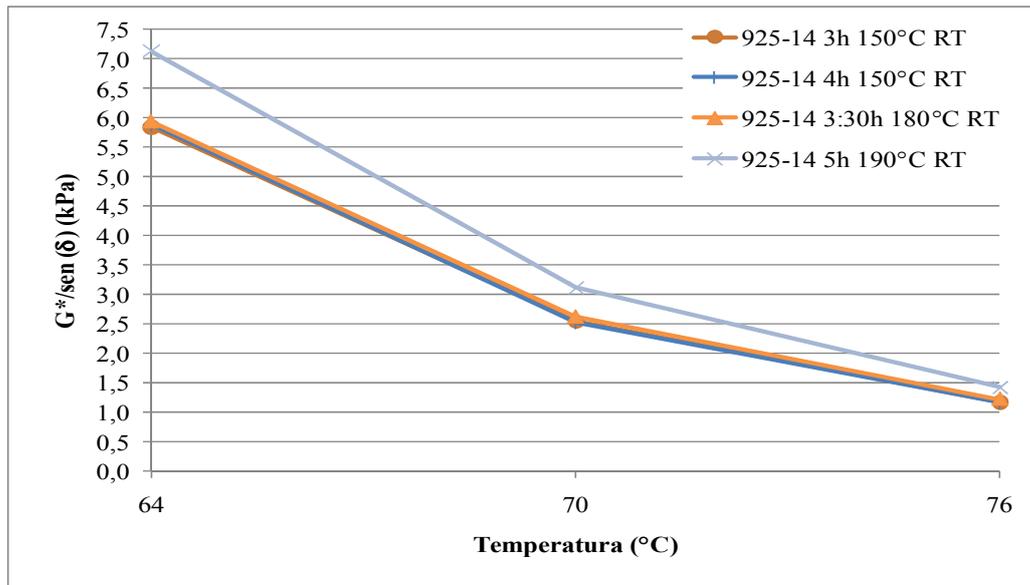


Figura 70. Comparación de las muestras que presentan menor susceptibilidad a la deformación después del acondicionamiento en el RTFO

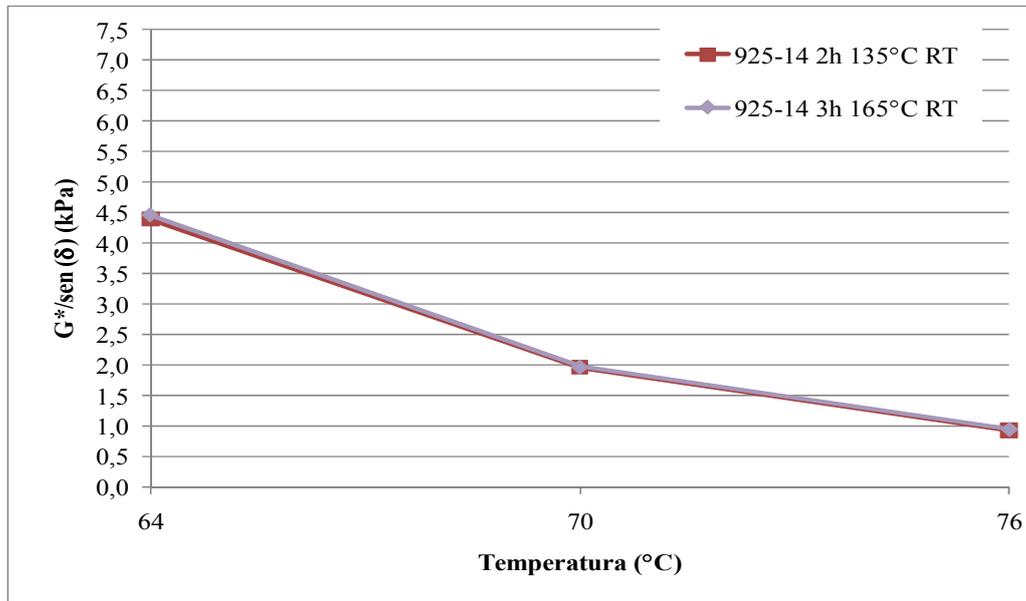


Figura 71. Comparación de las muestras que presentan mayor susceptibilidad a la deformación después del acondicionamiento en el RTFO



De los resultados anteriores, se observa que las muestras que presentan menor susceptibilidad tanto antes como después del acondicionamiento en el RTFO son la calentada en el horno de convección forzada a durante 3 horas a 150 °C y las muestras que se prepararon en el recipiente de mezclado durante 3:30 horas a 180 °C y durante 5 horas a 190 °C. Al calentar la muestra se espera la rigidización, lo cual también favorece la resistencia a la deformación permanente.

Es importante mencionar que, a pesar de estas premisas, todas las muestras cumplen con baja susceptibilidad a la deformación a 64 °C.

En Costa Rica es muy importante la susceptibilidad a la temperatura intermedia, pues muchos de los deterioros que se observan en el pavimento asfáltico son resultado de la fatiga, por esto también es importante determinar el comportamiento después del RTFO + PAV. La relación del módulo complejo y el ángulo de fase en este caso se modifica a $G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ y debe tener un valor máximo de 5,0 MPa. En la Tabla 18 se presentan los resultados de las mediciones a 22 °C, 25 °C y 28 °C.

Tabla 18. Resultados de módulo complejo, ángulo de fase y parámetro relacionado con la susceptibilidad a la fatiga después del acondicionamiento en el RTFO y en el PAV

Temperatura de medición (°C)	22	25	28	22	25	28	22	25	28
Parámetro	Módulo complejo (MPa)			Ángulo de fase, δ (°)			$ G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ (MPa)		
Condición de la muestra									
925-14 2h 135 °C	9,57	6,47	4,69	40,29	42,86	44,91	6,19	4,40	3,35
925-14 3h 135 °C	9,49	6,46	4,76	39,35	41,73	43,67	6,02	4,30	3,29
925-14 4h 135 °C	10,32	6,95	5,09	39,26	41,86	43,87	6,53	4,64	3,53
925-14 2h 150 °C	10,16	7,04	4,7716	40,82	43,26	45,78	6,65	4,82	3,4198
925-14 3h 150 °C	10,78	7,10	4,86	40,80	43,38	45,84	7,05	4,88	3,48
925-14 4h 150 °C	9,96	6,92	4,70	40,20	42,62	45,12	6,43	4,68	3,33
925-14 2h 165 °C	10,48	7,24	4,75	40,56	43,00	45,53	6,82	4,94	3,39
925-14 3h 165 °C	10,35	7,18	4,86	40,46	42,89	45,39	6,72	4,89	3,46
925-14 4h 165 °C	10,32	7,16	4,87	40,16	42,60	45,12	6,66	4,84	3,45
925-14 3h M 170 °C	10,05	6,94	4,69	41,16	43,63	46,18	6,62	4,79	3,38
925-14 3:30h M 180 °C	11,04	7,44	5,11	39,58	42,17	44,59	7,03	5,00	3,58
925-14 5h M 190 °C	12,36	8,36	5,83	38,71	41,02	43,28	7,70	5,49	4,00



En la Figura 72 se reitera el comportamiento de la muestra calentada a 150 °C durante 3 horas como punto de inflexión, pues los resultados aumentan antes de la misma y luego se reducen para mantenerse prácticamente constantes durante la evaluación a 165 °C y posteriormente se incrementan conforme aumenta la temperatura en el recipiente de mezclado.

Al igual que en las Figura 48 y Figura 60, el comportamiento se atenúa conforme aumenta la temperatura de ensayo.

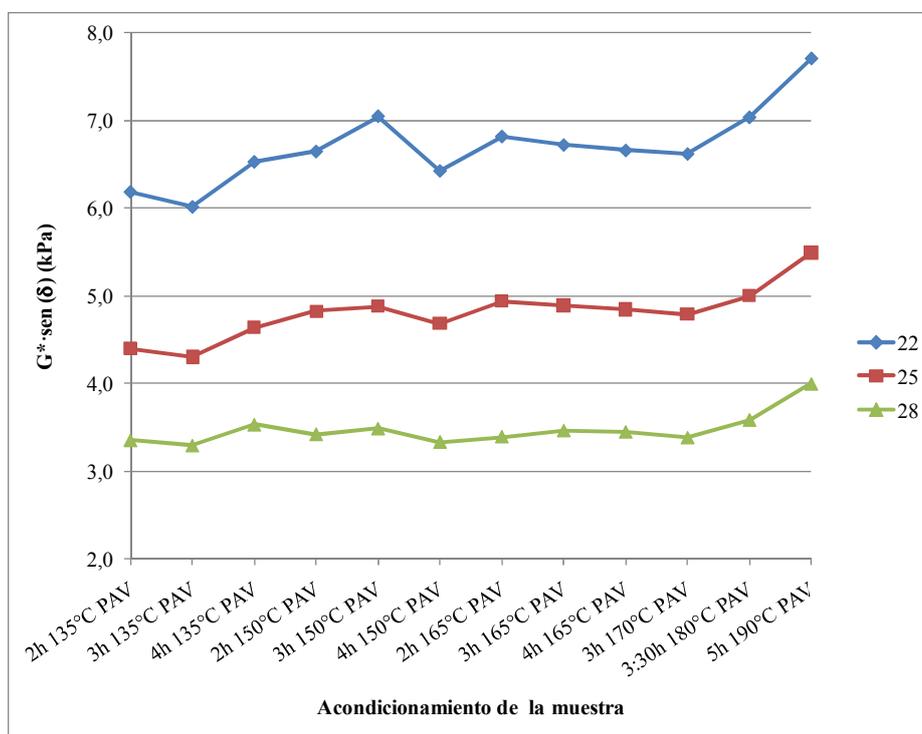


Figura 72. Comparación de los resultados de $G^* \cdot \text{sen}(\delta)$ para todas las muestras después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

Como era de esperar, la muestra que obtuvo la menor susceptibilidad a la deformación permanente por aumento de la rigidez, es el que presenta la mayor susceptibilidad al agrietamiento por fatiga. Según los resultados obtenidos no es susceptible a la fatiga cuando la temperatura intermedia es de 28 °C, la mayoría de los asfaltos que se usan en Costa Rica no son susceptibles a la fatiga a 25 °C.

En las figuras siguientes se comparan las muestras por tiempos y periodos de calentamiento para que se observe más fácilmente el resultado.

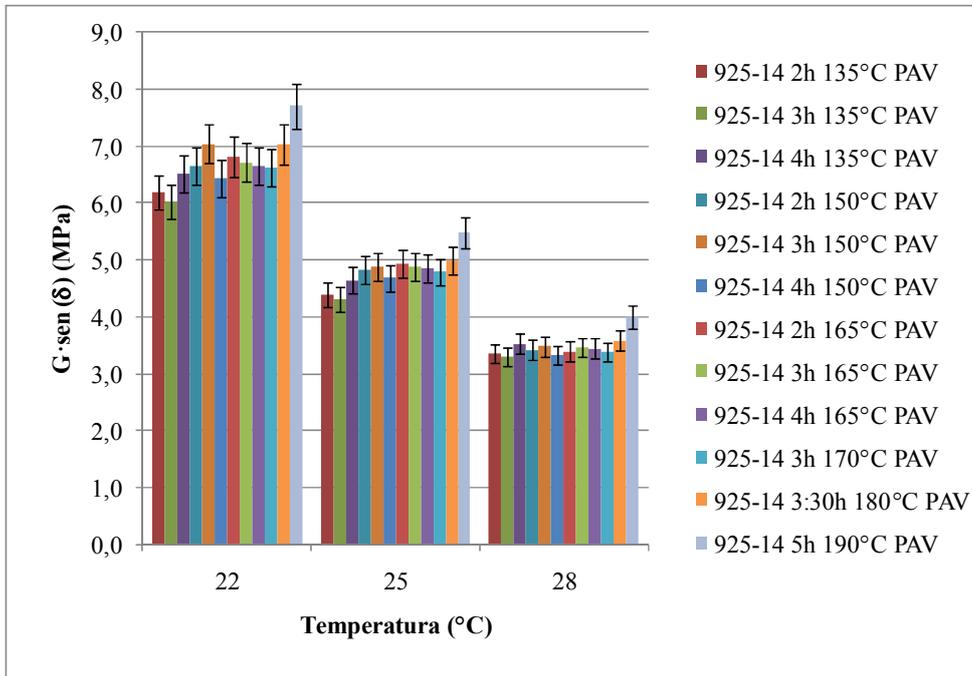


Figura 73. Comparación del parámetro de fatiga de todas las muestras después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

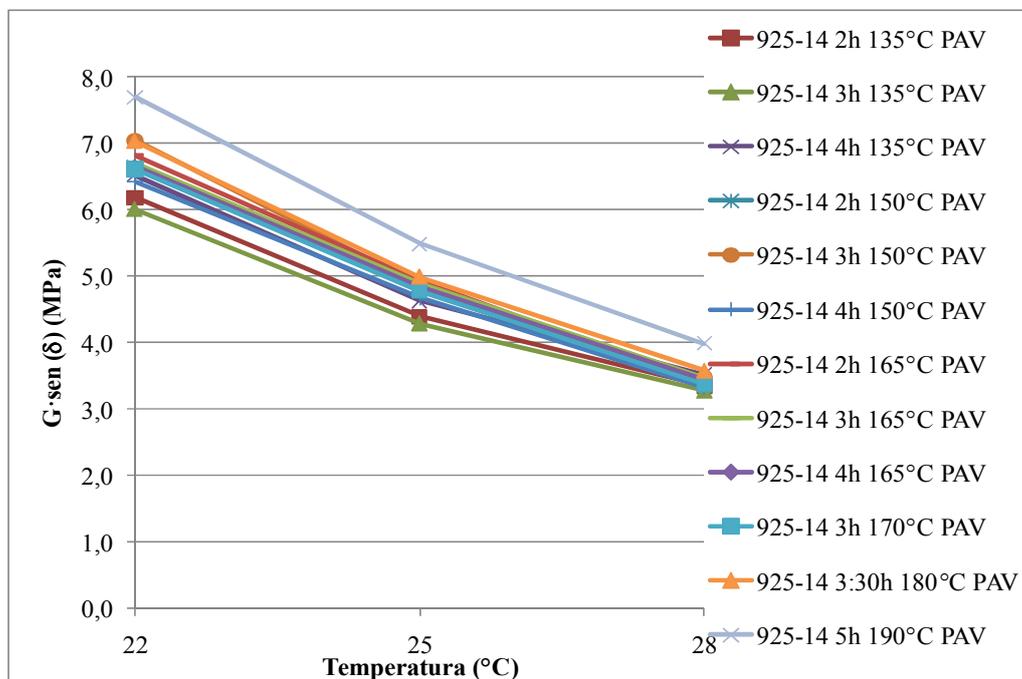


Figura 74. Comparación de las muestras que presentan mayor susceptibilidad a la fatiga después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

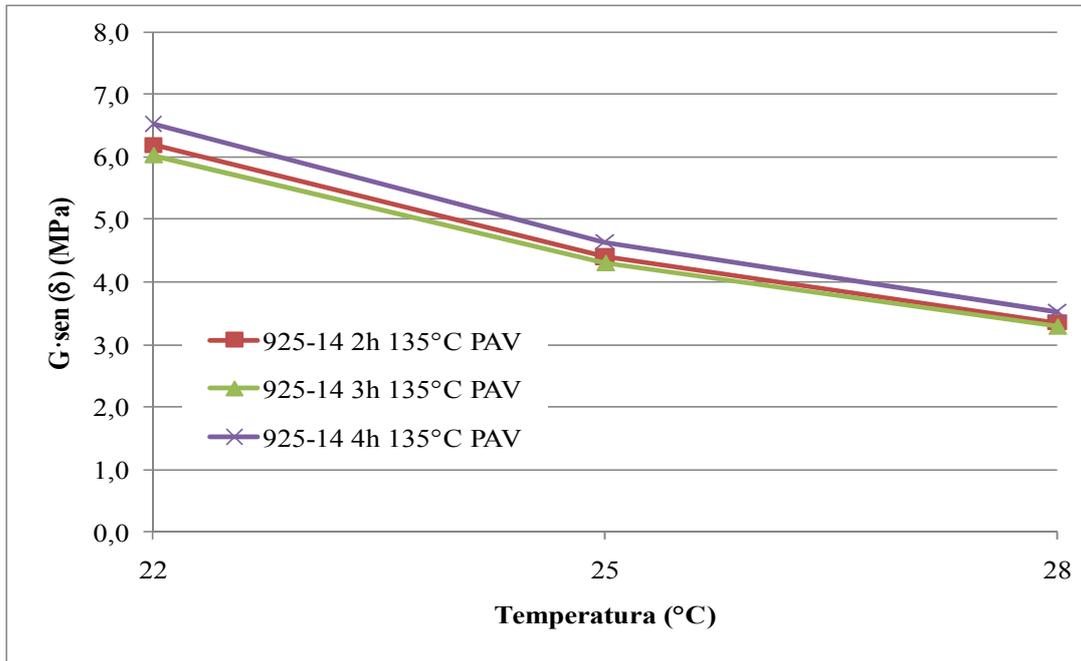


Figura 75. Comparación del parámetro de fatiga para la temperatura de 135 °C durante 2 horas, 3 horas y 4 horas después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

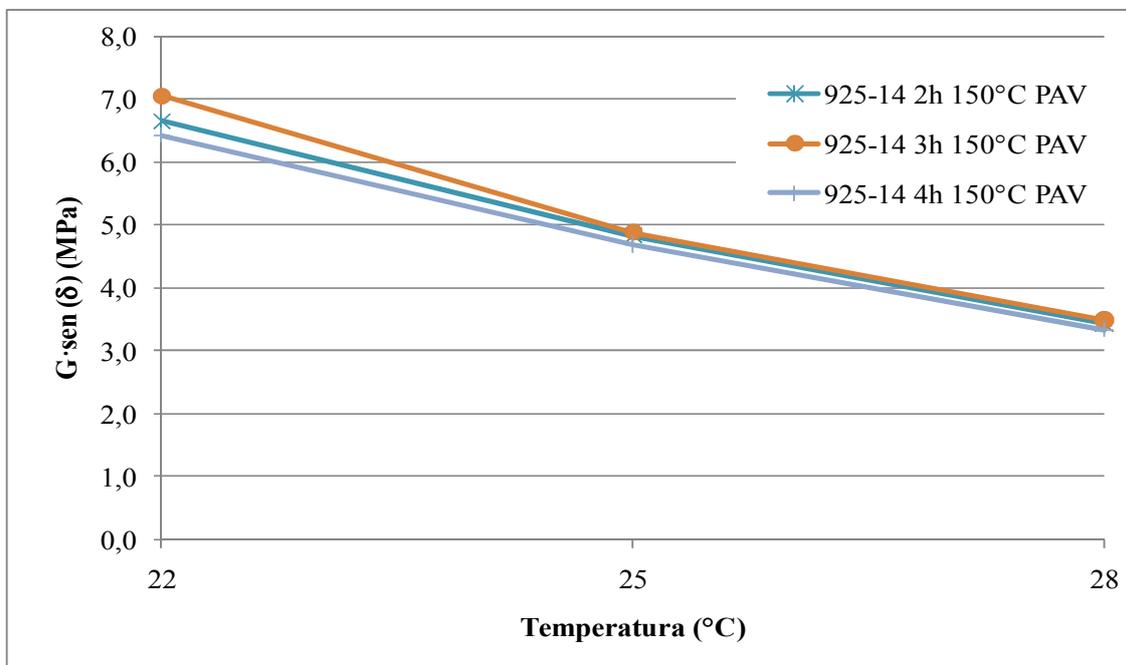


Figura 76. Comparación del parámetro de fatiga para la temperatura de 150 °C durante 2 horas, 3 horas y 4 horas después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

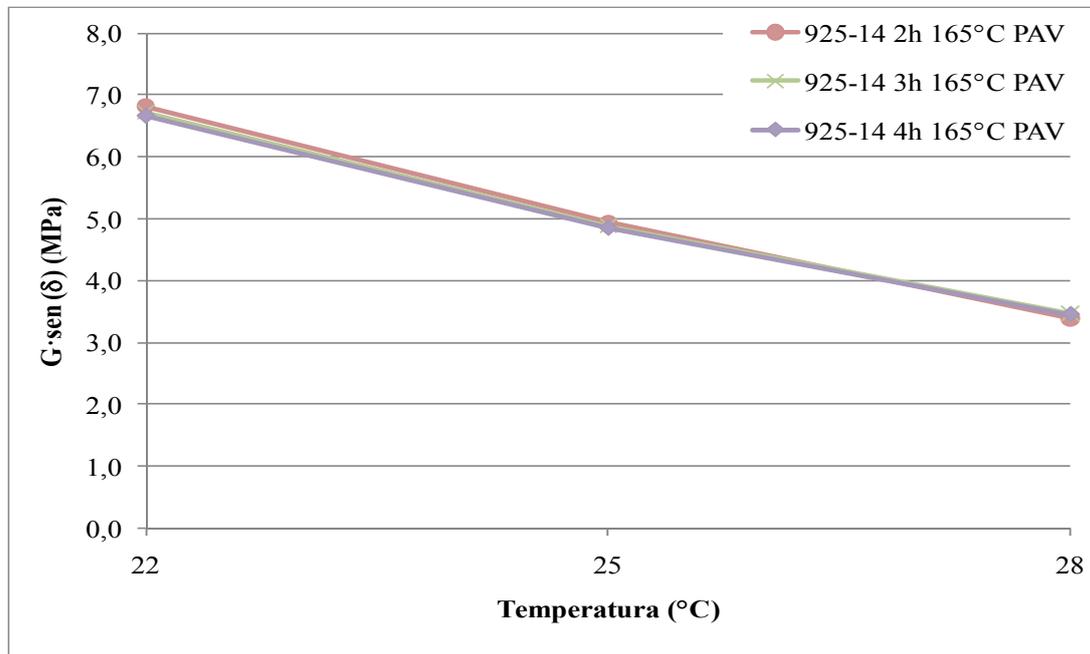


Figura 77. Comparación del parámetro de fatiga para la temperatura de 165 °C durante 2 horas, 3 horas y 4 horas después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

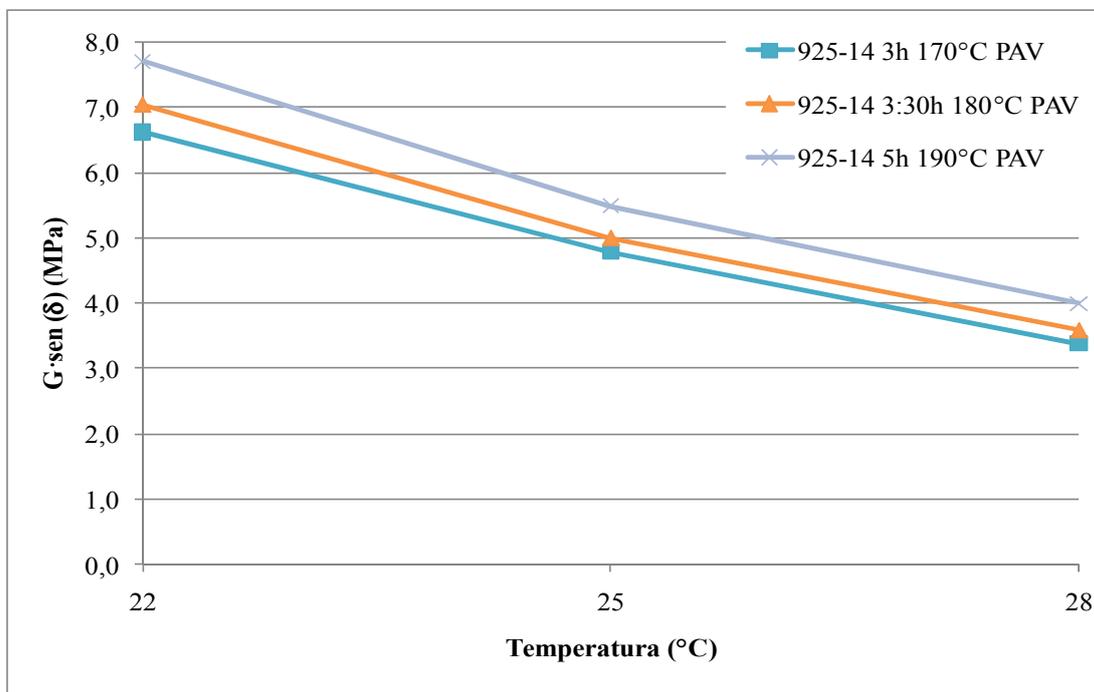


Figura 78. Comparación del parámetro de fatiga para las muestras preparadas en el recipiente de mezclado después del acondicionamiento en el RTFO + PAV



Los resultados más altos, que son los que se relacionan con mayor susceptibilidad a la fatiga son las muestras que se acondicionaron en el recipiente de mezclado, y los menos susceptibles son las muestras que se acondicionan a menores temperaturas.

Al realizar la comparación por periodo de calentamiento en las Figuras Figura 79, Figura 80 y Figura 81, se determina que las muestras acondicionadas a 135 °C son las que reportan menor susceptibilidad a la fatiga.

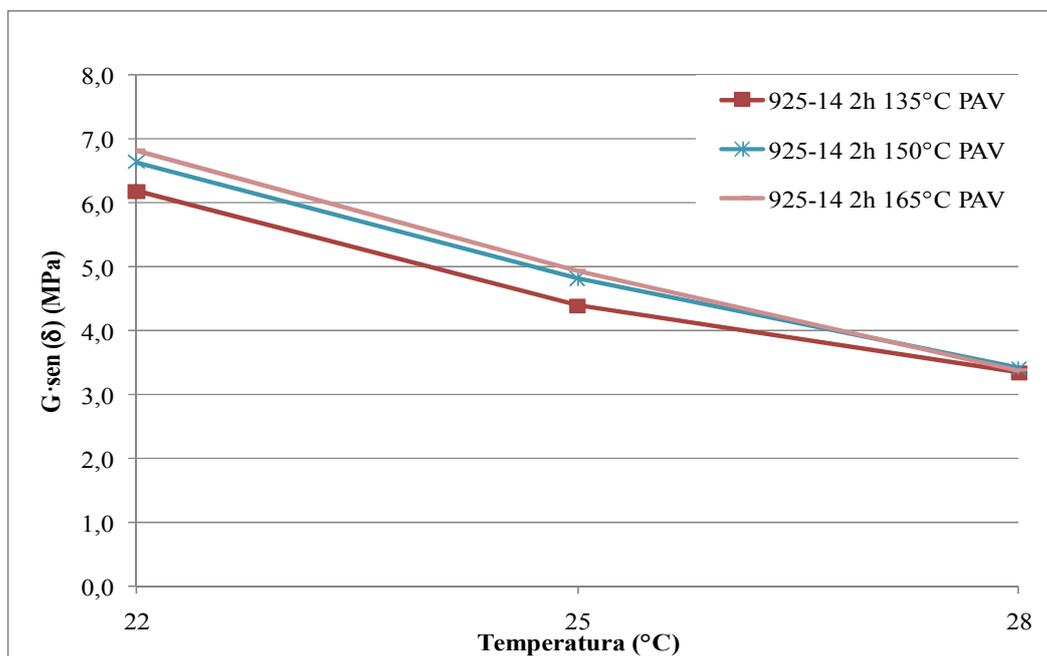


Figura 79. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 2 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C después del RTFO + PAV

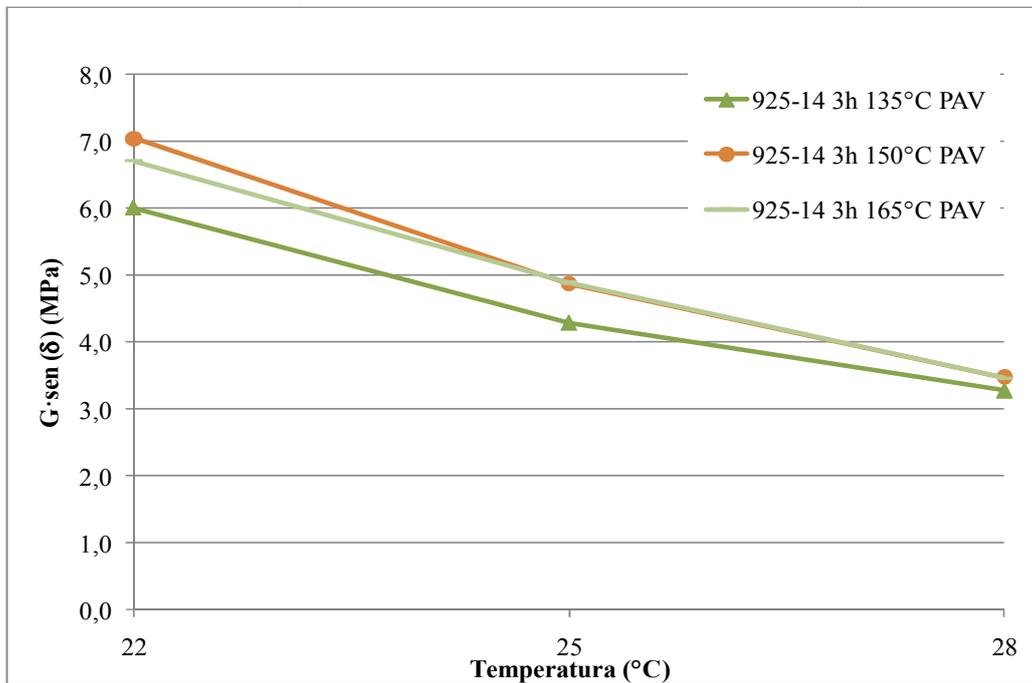


Figura 80. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 3 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C después del RTFO + PAV

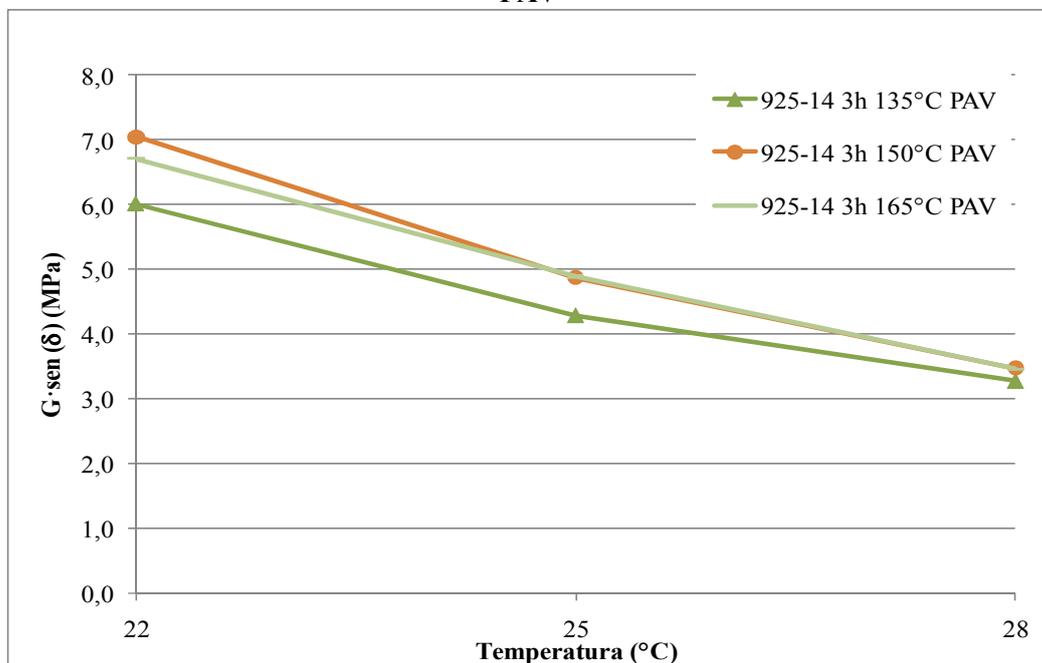


Figura 81. Comparación del parámetro de deformación para las muestras calentadas en el horno de convección forzada durante 4 horas a 135 °C, 150 °C y 165 °C después del RTFO + PAV



En la Figura 82 se presentan los resultados que reportan menos susceptibilidad a la fatiga. Incluye las muestras calentadas en el horno de convección forzada a 135 °C durante todos los periodos.

Las muestras con mayor susceptibilidad son las muestras calentadas en el recipiente e mezclado, excluyendo la muestra a 170 °C, también se observan las muestras calentadas en el horno de convección forzada a las mayores temperaturas, pero no las que se expusieron a ésta durante los periodos más largos (Ver Figura 83)

La complejidad del asfalto no permite predecir que los cambios tienen una relación directamente proporcional con los tiempos ni con la temperatura de calentamiento, pero si es evidente que el calentamiento durante 5 horas a 190 °C rigidiza sensiblemente el asfalto, lo cual es de suponerse pues las dos variables de análisis tienen valores máximos de acondicionamiento.

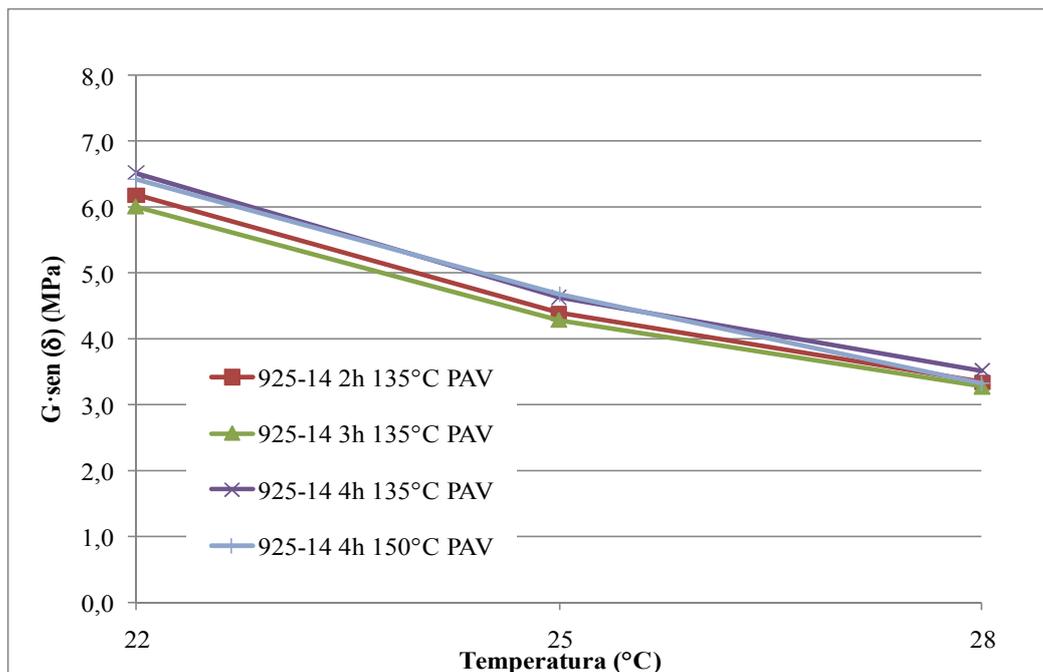


Figura 82. Comparación de las muestras que presentan menor susceptibilidad a la fatiga después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

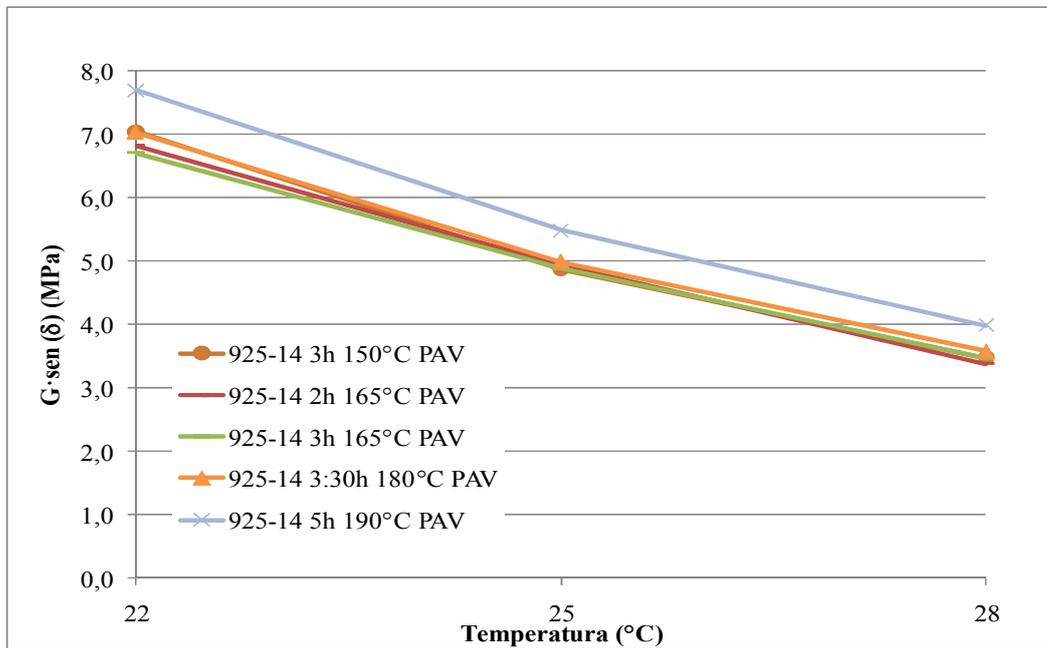


Figura 83. Comparación de las muestras que presentan mayor susceptibilidad a la fatiga después del acondicionamiento en el RTFO + PAV

Para poder determinar el efecto de la temperatura se evalúa otro parámetro que determina la capacidad del asfalto a resistir las cargas repetitivas, el cual se analiza en el siguiente apartado.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determina la clasificación según el Grado de Desempeño de cada una de las muestras. Estos resultados se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

2.3.3 Medición de parámetros reológicos relacionados con la resistencia a esfuerzos repetitivos

Para determinar la capacidad del asfalto expuesto a los diferentes acondicionamientos a las cargas de tránsito se utiliza la Recuperación Elástica a Esfuerzos Múltiples (MSCR, por sus siglas en inglés) que evalúa la recuperación elástica del asfalto y la resistencia a la deformación permanente en dos niveles de esfuerzo.

Este parámetro intenta reproducir el paso de las llantas sobre el pavimento aplicando un esfuerzo durante un segundo y permitiendo la recuperación del material durante nueve segundos, de manera cíclica hasta 10 repeticiones por nivel de esfuerzo. Se aplican a dos niveles de esfuerzo



cortante, a saber 1 kPa y 3,2 kPa para medir la recuperación elástica. El ensayo se hace al material después del acondicionamiento en el RTFO.

El MSCR se mide, según la normativa más reciente a la temperatura superior del proyecto que para Costa Rica es de 64 °C (Elizondo-Arrieta, Aguiar-Moya, Rodríguez-Castro, & Loría-Salazar, 2012).

Los resultados permiten establecer la carga de tránsito que es capaz de soportar el asfalto, según los criterios determinados por la normativa de referencia y que se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Clasificación de asfalto según las variables del ensayo MSCR

ESAL´s (Millones)	Clasificación		J _{nr} 3,2 kPa	J _{nr} diff
< 3	Estándar	S	max 4,0 kPa ⁻¹	< 75%
3 a 10	Pesado	H	max 2,0 kPa ⁻¹	< 75%
10 a 30	Muy pesado	VH	max 1,0 kPa ⁻¹	< 75%
>30	Extremadamente pesado	E	max 0,5 kPa ⁻¹	< 75%

En la Tabla 20 se presentan los resultados obtenidos que están compuestos por la recuperación elástica después de 10 ciclos de aplicación de carga de 1 kPa y después de 10 ciclos de aplicación de carga de 3,2 kPa. Con estos valores se determina la capacidad de recuperación del asfalto. También se mide el Jnr, que representa la deformación que no pudo ser recuperada para cada ciclo de esfuerzo aplicado. Con el parámetro Jnr se determina el nivel de tránsito que puede soportar el asfalto.

Si se observan los datos, la muestra calentada en el horno de convección forzada durante 3 horas a 165 °C tiene uno de los valores de recuperación elástica más alto, pero el valor de Jnr_{3,2 kPa} sobrepasa ligeramente el valor límite de 2 kPa⁻¹, lo cual obliga clasificarlo como estándar.

En la Figura 84 se observa como el resultado de la muestra calentada a 150 °C durante 3 horas es un punto de inflexión. En este caso la muestra calentada en el horno de convección forzada durante 3 horas a 165 °C es también un punto de inflexión que marca un descenso del valor desde esta muestra hasta las evaluadas a temperaturas superiores.



Tabla 20. Resultados del ensayo de MSCR a 64 °C

Condición de la Muestra 925-14	Recuperación Elástica			Jnr			Clasificación
	0,1 kPa	3,2 kPa	Diff	0,1 kPa	3,2 kPa	Diff	
2h 135°C	6,15	2,35	61,75	1,70	1,90	9,65	Pesado
3h 135°C	6,30	2,85	53,60	1,45	1,65	9,75	Pesado
4h 135°C	6,80	2,65	57,60	1,55	1,70	10,35	Pesado
2h 150°C	7,45	2,90	61,05	1,45	1,60	9,85	Pesado
3h 150°C	6,80	2,40	64,70	1,75	1,95	11,75	Pesado
4h 150°C	7,70	2,60	66,90	1,40	1,60	11,20	Pesado
2h 165°C	6,85	2,75	60,20	1,50	1,70	8,05	Pesado
3h 165°C	5,55	2,00	64,50	2,00	2,15	9,75	Estándar
4h 165°C	6,60	2,30	64,90	1,80	2,00	10,45	Pesado
3h 170°C	8,05	3,05	61,14	1,45	1,60	10,95	Pesado
3:30h 180°C	9,80	3,85	60,70	1,25	1,40	10,10	Pesado
5h 190°C	9,10	4,65	47,40	1,10	1,20	10,20	Pesado

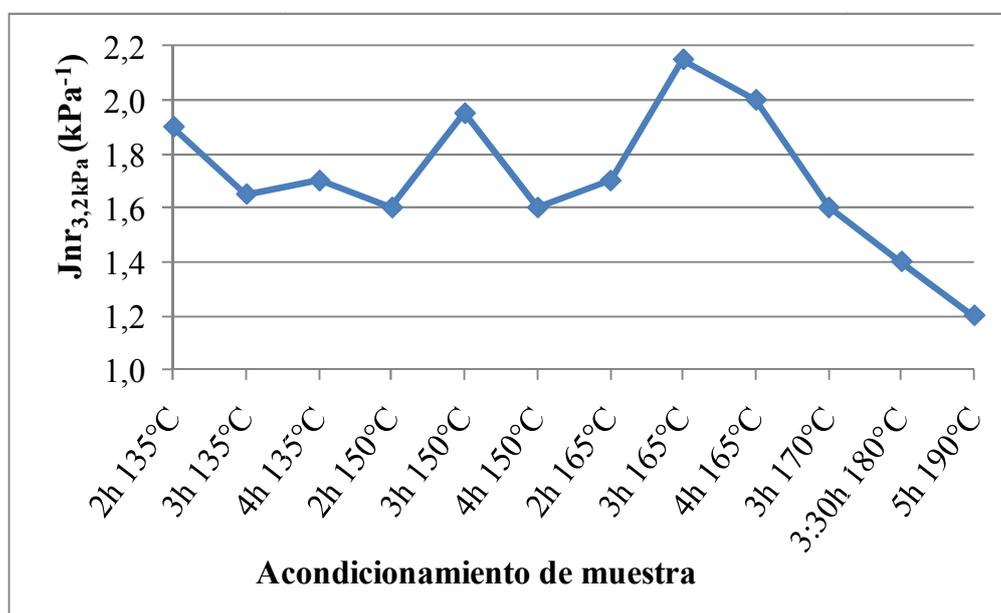


Figura 84. Comparación de los resultados de Jnr_{3,2 kPa} para todas las muestras después del acondicionamiento en el RTFO



En la Figura 85 se aprecia que la menor diferencia se obtiene para la muestra preparada en el recipiente de mezclado a 190 °C durante 5 horas, esto indica que presenta una alta capacidad de recuperar su condición inicial a ambos esfuerzos. Sin embargo, la recuperación más alta la presenta la muestra preparada en el recipiente de mezclado a 180 °C durante 3:30 horas.

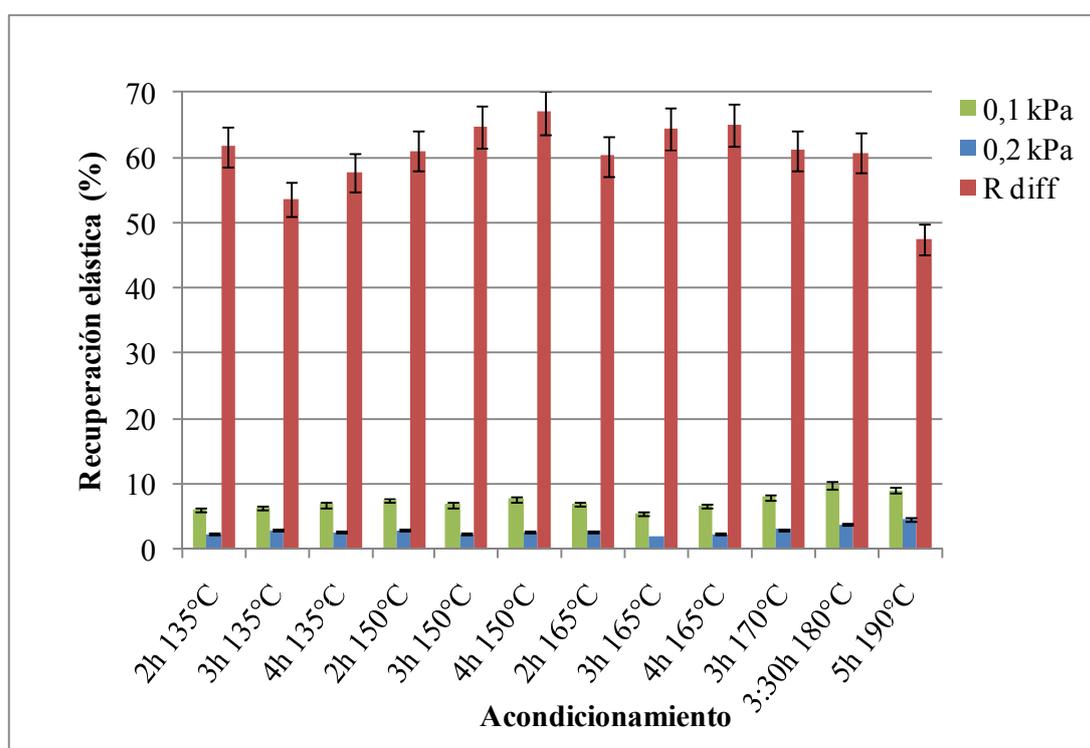


Figura 85. Comparación de los resultados de recuperación elástica obtenidos después de completar los ciclos a los esfuerzos de 0,1 kPa y 3,2 kPa

Los resultados de J_{nr} se observan en la Figura 86. Cuanto menor sea el valor de J_{nr} , menor será la susceptibilidad a la deformación permanente en el asfalto. Esto significa que la muestra preparada en el recipiente de mezclado a 190 °C durante 5 horas es la menos susceptible. Las que presentan mayor susceptibilidad a la deformación son la muestra original y la muestra calentada a 165 °C durante 3 horas.

Tanto la recuperación elástica como el J_{nr} a los diferentes esfuerzos se comparan mediante una diferencia de los resultados promedio a cada esfuerzo, con respecto al resultado a 0,1 kPa. En la recuperación elástica se interpreta que un valor elevado representa debilidad en el asfalto. En el caso del J_{nr} , si el valor es alto se considera que el material es susceptible a la acumulación de la deformación (Sandoval & Cremades, 2013)

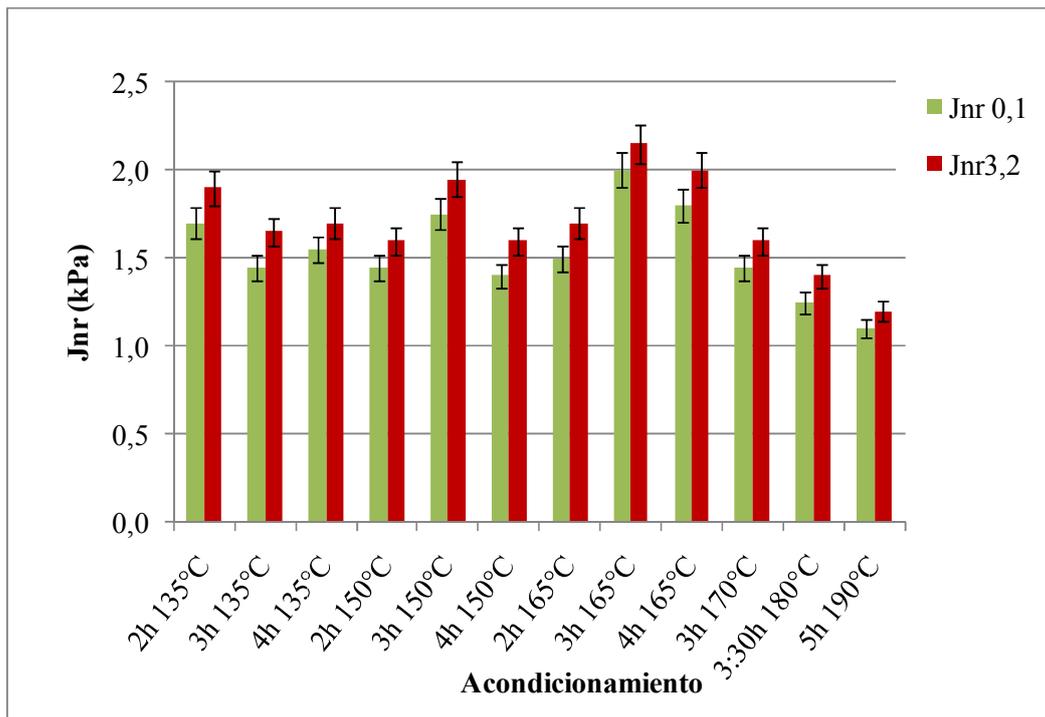


Figura 86. Comparación de los resultados de J_{nr} obtenidos después de completar los ciclos a los esfuerzos de 0,1 kPa y 3,2 kPa

Como se observa en la Figura 87 la muestra calentada a 165 °C durante 2 horas es la menos susceptible a la acumulación de la deformación y la mejor respuesta elástica se observa en la que la muestra preparada en el recipiente de mezclado a 190 °C durante 5 horas.

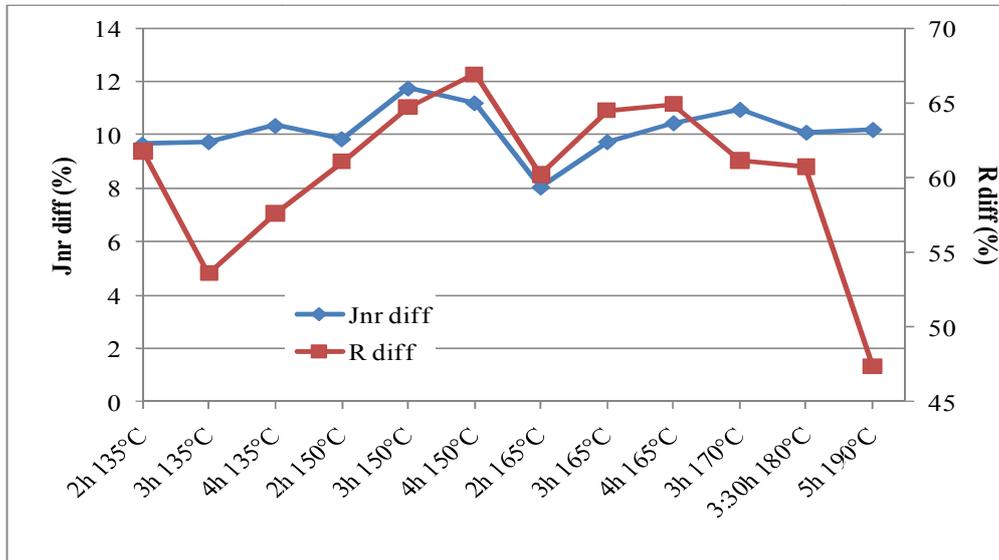


Figura 87. Comparación de los resultados Jnr diff y R diff

La clasificación PG plus establece la carga de tránsito que podría soportar el material de acuerdo con los parámetros Jnr_{diff} y $Jnr_{3,2 \text{ kPa}}$. Dicha clasificación define un valor máximo para el Jnr_{diff} de 75 % y para $Jnr_{3,2 \text{ kPa}}$ un valor máximo de 2 kPa para tránsito pesado. En la Figura 88 se muestra el comportamiento de ambos parámetros. Se observa que todas las muestras tienen un $Jnr_{3,2 \text{ kPa}}$ menor a 2 kPa, excepto la muestra calentada en el horno de convección forzada durante 3 horas a 165 °C.

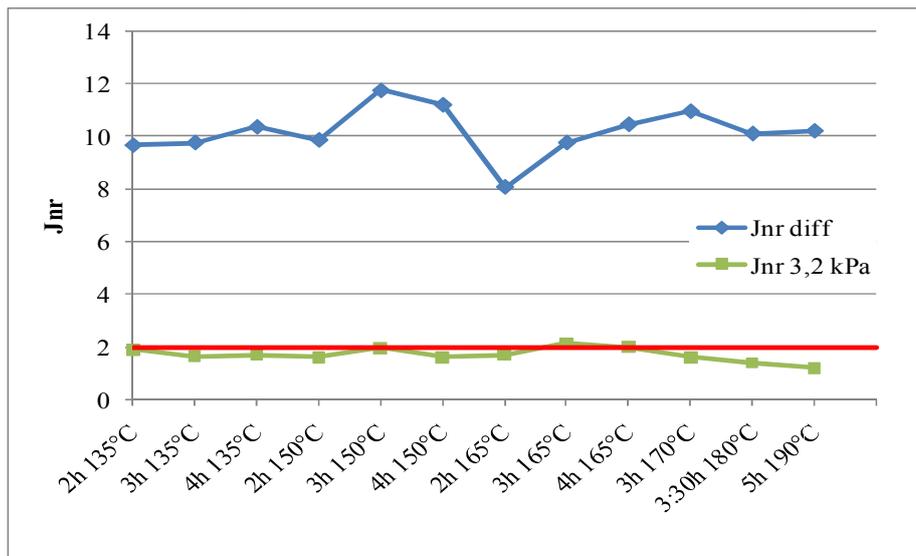


Figura 88. Comparación de los resultados Jnr diff y R diff



Con los resultados obtenidos es posible afirmar que no hay relación directa entre la temperatura de calentamiento y el tiempo de calentamiento y la respuesta del asfalto al ensayo de MSCR.

Tampoco se logra demostrar que el tiempo de calentamiento y la temperatura de calentamiento tiene efectos adversos en el asfalto ni que tienen relación directa con la oxidación, pero las temperaturas elevadas aceleran la pérdida de volátiles que causan la rigidización. Sin embargo es importante afirmar que el asfalto debe calentarse y mantenerse fluido para su manipulación durante el almacenamiento y el mezclado con el agregado en planta.

Las muestras analizadas cumplen con las especificaciones esperadas para un asfalto no modificado, que para la clasificación PG Plus a 64 °C como temperatura superior del proyecto, temperatura intermedia de 25 °C y clasificación H en la mayoría de los casos.

Tabla 21. Resumen de resultados de análisis reológicos

Condición de la muestra 925-14	PG			MSCR		
	Original	RTFO	RTFO+PAV	Jn _{3,2} kPa	Jn _{diff}	Clasificación
2h 135 °C	70	64	25	1,90	9,65	H
3h 135 °C	70	70	25	1,65	9,75	H
4h 135 °C	64	64	25	1,70	10,35	H
2h 150 °C	70	64	25	1,60	9,85	H
3h 150 °C	70	70	25	1,95	11,75	H
4h 150 °C	70	70	25	1,60	11,20	H
2h 165 °C	64	70	25	1,70	8,05	H
3h 165 °C	70	64	25	2,15	9,75	S
4h 165 °C	70	70	25	2,00	10,45	H
3h M 170 °C	70	70	25	1,60	10,95	H
3:30h M 180 °C	70	70	25	1,40	10,10	H
5h M 190 °C	70	70	28	1,20	10,20	H

Es importante observar que no es posible afirmar que un asfalto que tenga una temperatura superior de 64 °C sea automáticamente clasificado como S o que uno con temperatura superior de 70 °C se clasifique como H.

Los cambios observados en las variables reológicas no pueden asociarse a los periodos de calentamiento ni a las temperaturas



2.4 Conclusiones

En este estudio se analizan el efecto de la temperatura y periodo de calentamiento que se deben utilizar para su manipulación en planta o bien para mezclarlo con modificantes con la oxidación del asfalto, para lo cual se realizan acondicionamientos térmicos que intentan reproducir las condiciones de almacenamiento y mezclado que se requieren para la fabricación de asfalto modificado.

Además, se utilizan los ensayos de acondicionamiento que establece la metodología de diseño Superpave que pretenden simular el envejecimiento del asfalto en las distintas etapas de la fabricación y construcción, para determinar si el calentamiento previo influye en los resultados de clasificación por Grado de Desempeño.

Las conclusiones más relevantes son:

- No se producen compuestos químicos relacionados con los procesos de oxidación del asfalto en las muestras que fueran acondicionadas en el horno de convección forzada a 135 °C, 150 °C y 165 °C en ninguno de los periodos de calentamiento, lo cual permite afirmar que la temperatura de almacenamiento ni los periodos utilizados para asegurar su fluidez sean causantes directos de la oxidación.
- Tampoco se observan compuestos químicos relacionados con los procesos de oxidación en las muestras calentadas en el recipiente de mezclado, lo cual permite afirmar que las condiciones requeridas por los distintos polímeros de modificación no son causantes de la oxidación en el asfalto.
- Los ensayos que se utilizan en la metodología Superpave para simular los procesos de producción, colocación y operación del pavimento son los causantes de la oxidación, lo que se evidencia con la formación de sulfóxidos y carbonilos. Estos ensayos además de temperatura alta incluyen la exposición de la muestra al aire y a la presión.
- Los resultados de $G^*/\sin(\delta)$ no permiten establecer una correlación directa con la susceptibilidad a la deformación, sin embargo las muestras calentadas en el recipiente de mezclado a 180 °C y 190 °C y la calentada en el horno durante 3 horas a 150 °C, son las que presentan menor susceptibilidad antes y después del RTFO. A pesar de que el comportamiento no es lineal ni totalmente predecible si es posible concluir que la rigidización que provocan las temperaturas más altas, reduce la susceptibilidad.



- No se puede negar que la exposición del asfalto a altas temperaturas favorecen la pérdida de volátiles, lo cual provoca rigidización. Sin embargo no es posible establecer una correlación directa. Esto puede deberse a que no se desconocen los cambios que se producen en el asfalto como resultado de los cambios en las condiciones a las que se expone el material.
- Los resultados de la susceptibilidad a la fatiga son congruentes con la teoría, pues la rigidización reduce la susceptibilidad a la deformación, pero aumenta la susceptibilidad a la fatiga, lo cual se cumple con las muestras calentadas en el recipiente de mezclado a 180 °C y a 190 °C. Además, las muestras que reportan menor susceptibilidad a la fatiga son las muestras calentadas a la menor temperatura, es decir 135 °C, durante los periodos más cortos. No obstante, esto solo afecta la clasificación del asfalto para la muestra calentada a 190 °C que reporta una temperatura intermedia de 28 °C, todas las demás se clasifican en 25 °C
- El ensayo que nos permite predecir la respuesta del asfalto a las cargas de tránsito es el MSCR. Según los resultados obtenidos la muestra que tiene la mejor respuesta elástica es la muestra calentada a 180 °C y congruentemente con los parámetros anteriores, la muestra menos susceptible a la deformación permanente es la calentada a 190 °C, seguida de la calentada a 180 °C. Todas las muestras son capaces de soportar cargas pesadas de tránsito, excepto la muestra calentada durante 3 horas a 165 °C. En general los resultados no revelan una correlación directa con la temperatura o periodos de calentamiento.
- La complejidad del compuesto del asfalto impide establecer una relación simplista de variables para predecir el comportamiento del material, pero es claro que la oxidación se produce por una combinación de factores adicionales a la temperatura y periodos de calentamiento. No obstante, la temperatura y periodo de calentamiento si se puede relacionar con la pérdida de volátiles pero no de manera directa.

2.5 Recomendaciones

- Los resultados de la muestra acondicionada en el horno de convección forzada a 135 °C durante 2 horas no son los esperados, por lo que es recomendable repetir los ensayos realizados.
- Indagar los mecanismos de reacción que podrían explicar los puntos de inflexión que se detectan en los resultados reológicos.



2.6 Estudios futuros

Es importante determinar el efecto de los modificantes en los procesos de oxidación, por lo que se recomienda repetir el estudio usando los polímeros y los aditivos que se agregan para mejorar el comportamiento del material.

3. BIBLIOGRAFÍA

Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Bonilla-Mora, V., Rodríguez-Castro, E., Leiva-Villacorta, Fabricio, L.-S., y otros. (2014). *Análisis morfológico de las fases del asfalto con AFM*. Investigación, San José.

Al-Rub, R., darabi, M., Kim, S.-M., Litte, D., & Glover, C. (2013). Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging-susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete. *Construction and Building Materials* (41), 439-454.

Anderson, David; Marasteanu, Mihai. (1999). Physical hardening of asphalt binders relative to their glass transition temperatures. *Transportation research record*1661 , 27-34.

ASTM. (2009). *D 4124 Standard test method for separation of asphalt into four fractions*. Pensilvania: ASTM International.

Cañadas-Lorenzo, J. C. (1999). *Estudio del efecto de la cristalización fría y del envejecimiento físico en las relajaciones de los polímeros mediante la técnica de corrientes estimuladas térmicamente*. Universidad de Cataluña, Física e Ingeniería Nuclear, Cataluña.

Chávez-Valencia, L., & Hernández-Barriga, C. (2009). Estado del arte y perspectivas del envejecimiento de los pavimentos asfálticos. *Acta Universitaria* , 19 (1).

De Luca, L. (1978). Características de asfaltos viales envejecidos en laboratorio hasta valores críticos de su consistencia. . *Vigésima Primera Reunión del Asfalto, Argentina*, (págs. 159-172).

Del Águlia, P. (s.f.). *Camineros*. Obtenido de www.camineros.com/biblioteca.htm

Ecker, A. (2001). The application of Iatroskan-Technique for analysis of bitumen. *Pretroleum and Coal* , 43 (1), 51-53.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Elizondo-Arrieta, F., Aguiar-Moya, J. P., Rodríguez-Castro, E., & Loria-Salazar, L. (2012). *Propuesta de asfaltos para Costa Rica*.

Érij, V., Rásina, M., & Rudin, M. (1985). *Química y tecnología del petróleo y del gas*. Moscú: Mir Moscú.

Ewing, G. W. (1978). *Métodos instrumentales de análisis químicos* (4ta ed.). México, México: McGraw-Hill.

Gilbert, M. (2016). *Brydson's Plastics Materials. Chapter 3 States of aggregation in polymers* (8va ed.). Loughborough, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.

Hastie, R. (1991). *The effect of physycal aging on the creep response of termoplastic composite*. Disertación tesis doctoral en Ingeniería Mecánica, Virginia Polytechnic Institute , Blacksburg.

Kanabar, A. (2010). *Physical and chemical aging behavior of asphalt cements from two Northern Ontario pavement trials*. Thesis submitted to degree of Master of Science , Queen's University, Chemical.

Kanngiesser, I. (2015). *Envejecimiento artificial*. Tuttligen, Alemania.

Martín-Alfonso, M. J. (2013). *Modificación reactiva de betunes con prepolímeros*. Tesis sometida para el grado de doctorado, Universidad de Huelva, Ingeniería Química.

Mexicano, J. A., Hernández, G., Gutierrez, P., & Rangel, A. E. (2015). Efecto de la composición química del asfalto en el proceso de modificación con elastómeros SBS. *44° Reunião Anual de Pavimentação*. Iguazú, Brasil.

Mortazavi, M., & Moulthrop, J. S. (1993). *The SHRP Materials Reference Library SHRP-A-646*. (Tate, & C. J., Edits.) Washington, DC, Estados Unidos: National Academy of Sciences.

Oyekunle, L. (2006). Certain relationships between chemical composition and properties of petroleum asphalts from different origin. *Oil & Gas Science and Technology* , 61 (3), 433-441.

Paliukaitė, M., Vaitkus, A., & Zofka, A. (2014). Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology. *The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"*. Vilnius, Lituania.



Petersen, C., & Harnsberger, M. (1998). Asphalt aging. Dual oxidation mechanism and its interrelation with composition and oxidative hardening. *Transportation research* 1638 , 47-55.

Petersen, J. (1984). Chemical composition of the asphalt as related to asphalt durability: state of the art. *TRR*, (págs. 13-30).

Petersen, J., Roberson, R., Branthaver, J., Haensberger, P. D., Kim, S., Anderson, D., y otros. (1994). *Binder Characterization and Evaluation, Volume 4: Test Methods. SHRP A-370*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council.

Robertson, R. E. (1991). *Chemical properties of asphalt and their relationship to pavement performance. SHRP-A/uWp-91-510*. Washington D.C.: Strategic Highway Research Program.

Rodríguez-Castro, E., Salazar-Delgado, J., Zúñiga-Araya, C., & Aguiar-Moya, J. P. (2014). *Optimización del tiempo y temperatura de modificación de asfalto con SBS*. Universidad de Costa Rica, San Pedro.

Salazar, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). *Métodos y Materiales* , 1, 25-38.

Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J., Aguiar-Moya, J. P., & Rodríguez-Castro, E. (2016). *Propuesta de mecanismos de reacción involucrados en la oxidación del material bituminoso en presencia de aire, temperatura y agua*. Investigación, Universidad de Costa Rica.

Sandoval, I., & Cremades, I. (2013). Evolución del grado PG en la caracterización de asfalto. *CILA*. Guatemala.

Shell Bitumen. (1990). *Shell Bitumen Handbook* (Primera edición ed.). Chertsey, Surrey, Reino Unido: Shell Bitumen UK.

Sherma, J., & Fried, B. (2003). *Handbook of Thin-Layer Chromatography* (3ra ed.). Easton, Pennsylvania, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.

Sosa-Cárdenas, J. C. (2012). *Análisis cromatográfico del asfalto producido en la Refinería Estatal de Esmeraldas*. Tesis de grado, Universidad Central de Ecuador, Quito.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Stephens, F. (2004). *Thin layer chromatography-Flame ionization detection analysis of in-situ petroleum biodegradation*. Tesis de maestría, Texas A&M University.

Sultana, S., & Bhasin, A. (2014). Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials* (72), 293-300.

Thenoux, g. (1987). *Chemical characterization of asphalt cements using chromatographic techniques*. Disertación doctoral, Oregon State Univerity.

Thenoux, v. (1987). *Chemical characterization of asphalt cements using chromatographic techniques: relation to rheological properties and field performance*. Tesis de doctorado, Oregon State University, Oregon.

Vargas, X., Afanasjeva, N., Álvarez, M., & Marchal, P. C. (2008). Evolución del comportamiento viscoelástico del asfalto inducida bajo termo-oxidación in situ en un reo-reactor. *DYNA* , 75 (155).

Vargas-Arenas, X. (2004). *la formación de asfaltenos y su contribución a las propiedades reológicas de las fracciones pesadas del petróleo sometidas a termo-oxidación natural*. Tesis para Máster en Ciencias, Universidad Industrila de Santander, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga.