**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

# Evaluación del cambio por temperatura en las propiedades mecánicas y químicas de los geotextiles durante la colocación de sobrecapas asfálticas

**Trabajo de graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**Karol Melissa Gómez Aguirre**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica Junio, 2019

## Tribunal de graduación

Germán Valverde González
por:

**Director:** Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.

**Asesor:** Quím. Jorge Salazar Delgado

**Asesor:** Ing. Daniel Clark Araya

**Estudiante:** Karol Melissa Gómez Aguirre

## Derechos de autor

Fecha: 2019, junio, 20

**La suscrita, Karol Melissa Gómez Aguirre**, cédula 1-1570-0704, estudiantes de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B22799**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Evaluación del cambio por temperatura en las propiedades mecánicas y químicas de los geotextiles durante la colocación de sobrecapas asfálticas,** bajo la dirección del **Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información en esta obra.

## Dedicatoria

A Dios que me ha guiado y dado la fortaleza en este camino y a mis papás por el apoyo incondicional que me han brindado.

## Agradecimientos

A mi mamá, Lorena Aguirre Rodríguez, por ser ese soporte desde el inicio de mi carrera hasta el final, por ver lo positivo de todas las situaciones de la vida y por transmitirme esa energía y ganas de dar lo mejor siempre. A mi papá, Walter Gómez Álvarez, por apoyarme en cada decisión, por impulsarme a ser mejor cada día y por transmitirme esa espiritualidad que lo identifica. Les agradezco a mis padres por confiar en mí, por motivarme y por los valores que me inculcaron, en especial la responsabilidad y la perseverancia con los cuales me fue posible concluir una de las etapas más importantes de mi vida.

A mis hermanos, Angie y Greivin, por tolerarme en mis momentos de estrés y por retarme a ser ingeniera.

A mi comité asesor, al Quím. Jorge Salazar Delgado, al Ing. Daniel Clark Araya y al Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, por la disposición, guía y apoyo que recibí de parte de ustedes en cada etapa del proceso.

A la Ing. Paulina Leiva Padilla por ayudarme a plantear la propuesta de investigación y por su disposición ante cualquier consulta.

Al Ing. José Pablo Aguiar por la disposición de aclarar dudas y por el apoyo que recibí durante la etapa experimental.

A la Quím. Alejandra Baldi Sevilla por enseñarme el uso de varios equipos del laboratorio y por ayudarme con la interpretación de los datos.

A mi comunidad San Juan Pablo II que me llenaron de paz y valentía en los momentos difíciles.

A Marilyn Alfaro Montero, Natalia Rodríguez Oconitrillo y Arianna Quesada Salas por darme su amistad incondicional durante el transcurso de la carrera y la vida.

A mis compañeros de ingeniería civil que de una u otra manera me brindaron su apoyo y me impulsaron a alcanzar la meta de licenciatura en ingeniería civil, en especial a Silvia Barahona Mayorga que no solo fue una buena compañera sino una gran amiga.

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), por facilitar sus recursos y el uso de las instalaciones para la elaboración del presente trabajo.

# Índice de contenido

**Capítulo I. Introducción ..... 1**
**1.1. Justificación ..... 1**
1.1.1. El problema específico ..... 1
1.1.2 Importancia ..... 2
**1.2. Objetivos ..... 3**
1.2.1. Objetivo general ..... 3
1.2.2. Objetivos específicos ..... 3
**1.3. Antecedentes ..... 4**
**1.4. Delimitación del problema ..... 5**
1.4.1. Alcance ..... 5
1.4.2. Limitaciones ..... 6
**1.5. Metodología ..... 6**
1.5.1. Fase 1: Revisión bibliográfica ..... 7
1.5.2. Fase 2: Implementación de ensayos ..... 8
1.5.3. Fase 3: Análisis de resultados ..... 9
1.5.4. Fase 4: Informe final ..... 10
**Capítulo II. Marco teórico ..... 11**
**2.1. El reflejo de grietas en pavimentos ..... 11**
**2.2. Geosintéticos en la repavimentación ..... 13**
2.2.1. Tipos de geosintéticos utilizados en sobrecapas asfálticas ..... 14
2.2.2. Propiedades de los geosintéticos en la repavimentación ..... 17
**2.3. Emulsión asfáltica ..... 19**
2.3.1. Dosificación de emulsión asfáltica en repavimentación con geotextiles ..... 20
**2.4. Metodología constructiva para la rehabilitación con sobrecapas asfálticas utilizando geosintéticos ..... 21**
2.4.1. Materiales ..... 22
2.4.2. Equipo ..... 23
2.4.3. Construcción ..... 23
**2.5. Metodología de diseño del refuerzo con geotextil no tejido ..... 29**
**2.6. Ensayos de caracterización de polímeros ..... 31**
2.6.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) ..... 31

2.6.2. Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) ..... 35
2.6.3. Análisis Termogravimétrico (TGA) ..... 37
2.6.4. Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) ..... 42
2.6.5. Goniometría ..... 47
2.6.6. Resistencia a la tensión GRAB ..... 50

**Capítulo III. Etapa experimental y resultados ..... 51**
**3.1. Esquema experimental ..... 51**
3.1.1. Materiales utilizados en el proyecto ..... 51
3.1.2. Metodología de aplicación de la emulsión asfáltica ..... 52
**3.2. Ensayos de laboratorio ..... 55**
3.2.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) ..... 55
3.2.2. Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) ..... 56
3.2.3. Análisis Termogravimétrico (TGA) ..... 58
3.2.4. Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) ..... 61
3.2.5. Goniometría ..... 63
3.2.6. Resistencia a la tensión GRAB ..... 69
**3.3. Análisis de Resultados ..... 73**
3.2.1. Caracterización física ..... 73
3.2.2. Caracterización química ..... 83
3.2.3. Caracterización mecánica ..... 109

**Capítulo IV. Conclusiones y recomendaciones ..... 113**
**4.1. Conclusiones ..... 113**
**4.2. Recomendaciones ..... 118**

**Referencias bibliográficas ..... 120**

**A. Apéndice ..... 127**
**A.1. Síntesis de los ensayos realizados ..... 127**
**A.2. Propuesta de modificación a las secciones del CR-2010 ..... 128**
A.2.1. Especificación actual Sección 714.) MATERIALES GEOCOMPUESTOS Y GEOTEXTILES PARA DRENAJE ..... 128
A.2.2. Modificación Sección 714.) MATERIALES GEOCOMPUESTOS Y GEOTEXTILES UTILIZADOS EN CARRETERAS ..... 128

A.2.3. Especificación actual Sección 719.) GEOTEXTILES PARA PAVIMENTOS ..... 131
A.2.4. Modificación Sección 719.) GEOTEXTILES PARA PAVIMENTOS ..... 134
**A.3. Datos de salida de los ensayos realizados..... 143**
**B. Anexos ..... 144**

## Índice de figuras

Figura 1. Metodología propuesta para desarrollar la investigación..... 7
Figura 2. Ensayos por realizar en cada etapa ..... 9
Figura 3. Propagación de la grieta ..... 13
Figura 4. Geotextiles para sobrecapas (a) tejidos y (b) no tejidos ..... 15
Figura 5. Geomallas para sobrecapas ..... 16
Figura 6. Geocompuesto para sobrecapas ..... 16
Figura 7. Estructura molecular del polipropileno usado en la manufactura de geosintéticos.. 18
Figura 8. Espesor de diseño para estructuras de pavimento flexible usando el CBR y el DTN 31
Figura 9. Esquema simplificado del modo de funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)..... 32
Figura 10. Resultado de la interacción del haz de electrones con la muestra..... 33
Figura 11. Apariencia de los resultados de SEM mediante electrones secundarios ..... 34
Figura 12. Apariencia de los resultados de SEM mediante electrones retrodispersados ..... 34
Figura 13. Esquema de un espectrómetro FT-IR con un interferómetro Michelson clásico .... 36
Figura 14. Esquema típico de TGA ..... 39
Figura 15. Curvas de TGA típicas ..... 40
Figura 16. Comparación de curvas TG y DTG..... 42

Figura 17. Esquema del método de calorimetría diferencial de barrido de potencia compensada ..... 43

Figura 18. Esquema del método de calorimetría diferencial de barrido de flujo de calor..... 44

Figura 19. Termograma típico de un polímero semicristalino ..... 45

Figura 20. Termograma hipotético de DSC ..... 46

Figura 21. Interpretación de curvas DSC ..... 47

Figura 22. Esquema del ángulo de contacto..... 48

Figura 23. Ángulo de contacto en una superficie hidrofóbica e hidrofílica ..... 49

Figura 24. Esquema de ensayo ASTM D4632 ..... 50

Figura 25. Metodología de aplicación de riego de liga por peso ..... 53

Figura 26. Muestras de geotextil no tejido de polipropileno recubiertas para la aplicación de la técnica SEM ..... 55

Figura 27. Microscopio Electrónico de Barrido S-3700N..... 56

Figura 28. Aplicación del ensayo FTIR a la muestra de geotextil no tejido de polipropileno .. 57

Figura 29. Partes principales del analizador termogravimétrico Q5000 de TA Instruments ... 58

Figura 30. Colocación del geotextil no tejido de polipropileno en el portamuestras para el ensayo de TGA..... 59

Figura 31. Partes principales del calorímetro diferencial de barrido Q2000-2220 de TA Instruments ..... 61

Figura 32. Colocación de las cápsulas de referencia y la muestra de geotextil no tejido de polipropileno en el equipo de DSC..... 62

Figura 33. Goniómetro Ramé-hart ..... 64

Figura 34. Equipo de goniometría (a) con gotero manual (b) con jeringa dispensadora y controlador de temperatura..... 64

Figura 35. Llenado de pipetas Pasteur con asfalto ..... 65

Figura 36. Limpieza de pipetas Pasteur ..... 65

Figura 37. Colocación de jeringa dispensadora con control de temperatura ..... 66

Figura 38. Preparación de muestras (a) geotextil – asfalto (b) agregado – asfalto ..... 67

Figura 39. Colocación de la esfera de calibración ..... 68

Figura 40. Ubicación de los límites de medición ..... 68

Figura 41. Nivelación de la muestra ..... 68

Figura 42. Medición del ángulo de contacto, $\theta c$, en cada borde de la gota de asfalto ..... 69

Figura 43. Muestras para ser ensayadas a resistencia a la tensión GRAB ..... 70

Figura 44. Demarcación de muestras para ser evaluadas en el ensayo de resistencia a la tensión GRAB ..... 70

Figura 45. (a) Emulsión asfáltica CRS-1 y (b) muestras de geotextil no tejido impregnadas con emulsión asfáltica ..... 71

Figura 46. Configuración de ensayo de resistencia a la tensión GRAB ..... 72

Figura 47. Aplicación de la prueba de resistencia a la tensión GRAB ..... 72

Figura 48. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 a temperatura ambiente ..... 73

Figura 49. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 60 °C ..... 74

Figura 50. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 80 °C ..... 75

Figura 51. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 150 °C ..... 75

Figura 52. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 170 °C ..... 76

Figura 53. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 a temperatura ambiente ..... 77

Figura 54. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 60 °C ..... 77

Figura 55. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 80 °C ..... 78

Figura 56. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 150 °C ..... 79

Figura 57. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 170 °C ..... 79

Figura 58. Micrografías de barrido electrónico a diferentes temperaturas para el geotextil MacTex® N 27.1 a una resolución x750 ..... 80

Figura 59. Micrografías de barrido electrónico a diferentes temperaturas para el geotextil MacTex® N 40.1 a una resolución x60 ..... 81

Figura 60. Comparación según gramaje de micrografías de barrido electrónico para los geotextiles acondicionados a 150 °C ..... 82

Figura 61. Comparación según gramaje de micrografías de barrido electrónico para los geotextiles acondicionados a 170 °C ..... 83

Figura 62. Espectros a temperatura ambiente del geotextil MacTex® N 27.1 ..... 84

Figura 63. Espectros a temperatura ambiente del geotextil MacTex® N 40.1 ..... 84

Figura 64. Comparación de espectros de la muestra de geotextil MacTex® N 27.1 y MacTex® N40.1 a temperatura ambiente ..... 85

Figura 65. Comparación del espectro del Atlas de compuestos orgánicos (a) con el obtenido en el laboratorio (b) ..... 86

Figura 66. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 60 °C. 87

Figura 67. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 80 °C. 87

Figura 68. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 150 °C ..... 87

Figura 69. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 170 °C ..... 88

Figura 70. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 a temperaturas bajas... 88

Figura 71. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 a temperaturas altas ... 89

Figura 72. Geotextil MacTex® N 27.1 antes del acondicionamiento térmico (a) y después del acondicionamiento a 170 °C (b) ..... 90

Figura 73. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 60 °C. 90

Figura 74. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 80 °C. 91

Figura 75. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 150 °C ..... 91

Figura 76. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 170 °C ..... 91

Figura 77. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 a temperaturas bajas... 92

Figura 78. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 a temperaturas altas ... 93

Figura 79. Estructura molecular del propileno ..... 93

Figura 80. Comparación de espectros de las muestras de geotextil MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 acondicionadas a 170 °C ..... 94

Figura 81. Termograma de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 27.1 ..... 95

Figura 82. Termograma de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 27.1 ..... 96

Figura 83. Termograma de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 27.1 ..... 96

Figura 84. Termograma de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 40.1 ..... 97

Figura 85. Termograma de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 40.1 ..... 98

Figura 86. Termograma de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 40.1 ..... 98

Figura 87. Comparación de termogramas de las muestras de geotextil no tejido MacTex® N 27.1 y MacTex® N40.1 ..... 100

Figura 88. Curva DSC de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 27.1 ..... 101

Figura 89. Curva DSC de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 27.1 ..... 102

Figura 90. Curva DSC de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 27.1 ..... 102

Figura 91. Curva DSC de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 40.1 ..... 103

Figura 92. Curva DSC de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 40.1 ..... 103

Figura 93. Curva DSC de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 40.1 ..... 104

Figura 94. Comparación de curvas DSC de la muestra de geotextil MacTex® N 27.1 y MacTex® N40.1 ..... 105

Figura 95. Resultados promedio del ensayo de goniometría para los distintos materiales ... 109

Figura 96. Muestras falladas en el ensayo de resistencia a la tensión GRAB ..... 110

Figura 97. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 27.1 sin impregnar ..... 110

Figura 98. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 27.1 impregnado 110

Figura 99. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 40.1 sin impregnar ..... 111

Figura 100. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 40.1 impregnado ..... 111

Figura A1. Ángulo correcto de las boquillas del distribuidor ..... 132

Figura A2. Altura correcta de las boquillas del distribuidor ..... 132

Figura A3. Ángulo correcto de las boquillas del distribuidor ..... 138

Figura A4. Altura correcta de las boquillas del distribuidor ..... 138

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Funciones desarrolladas por los distintos tipos de geosintéticos..... 14

Cuadro 2. Propiedades requeridas por los geotextiles no tejidos para la prevención del reflejo de grietas ..... 18

Cuadro 3. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de bajo volumen..... 18

Cuadro 4. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de alto volumen ..... 19

Cuadro 5. Demanda de sellador de la superficie de pavimento asfáltico ..... 21

Cuadro 6. Tasas de aplicación de ligante asfáltico según gramaje del geotextil no tejido ..... 21

Cuadro 7. Condiciones del pavimento cuando se utilizan sistemas intercapa..... 25

Cuadro 8. Resultados de laboratorio valores FEF y el efecto del tipo de geotextil y su valor de módulo ..... 29

Cuadro 9. Humectación de acuerdo al ángulo de contacto ..... 49

Cuadro 10. Dotación de emulsión asfáltica para aplicar a cada muestra de geotextil ..... 53

Cuadro 11. Cantidad de emulsión asfáltica a aplicar según metodología de dosificación por peso ..... 54

Cuadro 12. Promedio de los resultados de porcentaje de pérdida de masa para las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1..... 99

Cuadro 13. Promedio de las temperaturas de transición para las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 ..... 100

Cuadro 14. Promedio de los resultados de las transiciones térmicas para las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 ..... 105

Cuadro 15. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y geotextil MacTex® N 27.1 ..... 106

Cuadro 16. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y geotextil MacTex® N 40.1 ..... 107

Cuadro 17. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y agregado calizo..... 107

Cuadro 18. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y agregado silíceo..... 108

Cuadro 19. Clasificación de superficies utilizadas en el ensayo de goniometría..... 108

Cuadro 20. Resultados promedio del ensayo de tensión GRAB ..... 112

Cuadro A1. Ensayos realizados ..... 127

Cuadro A2. Requisitos físicos para tejido de pavimentación. Tabla 714-6 ..... 128

Cuadro A3. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de bajo volumen..... 129

Cuadro A4. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de alto volumen ..... 129

Cuadro A5. Condiciones del pago..... 134

Cuadro A6. Condiciones del pavimento cuando se utilizan sistemas intercapa ..... 135

Cuadro A7. Condiciones del pago..... 142

Cuadro B1. Proyectos de conservación vial con geosintéticos en Costa Rica..... 144

Gómez Aguirre, Karol Melissa
Evaluación del cambio por temperatura en las propiedades mecánicas y químicas de los geotextiles durante la colocación de sobrecapas asfálticas.
Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:
K. Gómez A., 2019
xv, 126, [20]h; ils. col. - 69 refs.

## RESUMEN

La colocación de una sobrecapa asfáltica es una de las técnicas implementadas cuando se tiene un estado severo de agrietamiento por fatiga en la capa superior del pavimento, pero la estructura debajo de la misma aún posee capacidad estructural. Con la finalidad de garantizar un aumento en la vida útil de la estructura de pavimento, se recomienda colocar un geotextil entre la capa vieja y la nueva con el fin de retardar el reflejo de grietas por fatiga, ya que este material reduce los esfuerzos concentrados en las discontinuidades de las grietas existentes y genera menores deflexiones ante las solicitudes del tránsito.

Las propiedades mecánicas del geotextil utilizado en la rehabilitación de pavimentos asfálticos pueden sufrir alteraciones al entrar en contacto con la temperatura de la mezcla asfáltica, ya que su punto de fusión es cercano a la temperatura de colocación de dicha mezcla.

La presente investigación evalúa la influencia de la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de dos gramajes de geotextil no tejido de polipropileno, a través de los ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR), Análisis Termogravimétrico (TGA), Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), Goniometría y Resistencia a la tensión GRAB. El desarrollo de este estudio procura comprender el funcionamiento del geotextil como sistema intercapa con el fin de garantizar un adecuado desempeño del pavimento durante su vida útil y una apropiada inversión de los recursos disponibles.

PALABRAS CLAVE: PAVIMENTOS FLEXIBLES, REHABILITACIÓN, GEOTEXTILES, REFLEJO DE GRIETAS, TEMPERATURA.

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Civil

# Capítulo I. Introducción

## 1.1. Justificación

El reflejo de grietas es un deterioro común encontrado en pavimentos con tecnología de sobrecapas asfálticas. En la rehabilitación de pavimentos se han desarrollado técnicas con geosintéticos, los cuales funcionan como una capa de alivio de esfuerzos, que retarda la propagación de las grietas que existen en el pavimento deteriorado hacia la nueva capa bituminosa, mejorando de este modo la condición de la carretera y extendiendo su vida útil.

Para asegurar la adherencia entre la superficie de pavimento viejo y la sobrecapa asfáltica, en el caso de los geotextiles, se debe colocar ligante asfáltico suficiente para impregnar el geotextil y garantizar la unión entre capas. Debido a que, la sobrecapa asfáltica normalmente se coloca a temperaturas entre los 120 °C y los 160 °C, y de acuerdo con la norma AAHSTO M288, el geotextil debe tener un punto de fusión que debe ser mayor o igual a 163 °C, es posible que las propiedades mecánicas y químicas de estos materiales se vean afectadas por el efecto de la temperatura.

Debido a que recientemente se ha impulsado el uso de estos materiales en sistemas de rehabilitación en Costa Rica, es necesario evaluar el posible daño mecánico y químico en el material durante la aplicación de esta técnica. En el Cuadro B1 de la sección de Anexos se puede observar su utilización en proyectos del país.

### 1.1.1. El problema específico

Durante la colocación de sobrecapas asfálticas, el agrietamiento presente en la capa existente genera concentraciones de esfuerzos alrededor de las grietas y por tanto su propagación hacia la nueva capa asfáltica. Este problema puede retardarse a través del uso de sistemas intercapa, como lo son los geosintéticos.

El uso de geosintéticos mejora la resistencia a la tensión entre capas brindando mayor vida útil al pavimento ante la aplicación de cargas, por lo que en los últimos años se ha venido incrementando el uso de este procedimiento en el país. Sin embargo, se conoce poco sobre la mecánica desarrollada en este tipo de materiales, y no se tiene un conocimiento pleno de

factores que los podrían afectar en el momento de instalación, tal como lo es la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica, ya que ésta normalmente se coloca a altas temperaturas (hasta los 160 °C).

En Costa Rica las especificaciones técnicas o normativas actuales sobre el uso de geosintéticos para el refuerzo de pavimentos requiere ser actualizada y mejorada. Posibles mejoras a tomar en cuenta son consideraciones en la técnica adecuada durante la instalación de este sistema, de manera que el material no se vea afectado en su composición química y mecánica, puesto que esto puede reducir los beneficios para los cuales está siendo instalado. Por esta razón se hace pertinente la evaluación de sus propiedades más a fondo.

Durante esta investigación se evaluará química y mecánicamente el daño que pueden sufrir los geotextiles utilizados como sistemas anti-reflejo de grietas en pavimentos flexibles debido a las altas temperaturas de colocación de la mezcla asfáltica en caliente, esto con el fin de comprender de mejor manera su comportamiento y garantizar el éxito de la utilización de esta técnica, prolongando el tiempo de intervención a la carretera rehabilitada.

### 1.1.2 Importancia

La predicción u observación de los deterioros existentes en el pavimento es de suma importancia para una adecuada gestión de pavimentos, ya que es a través de estos indicios que se desarrollan estrategias para contrarrestar el daño y ampliar el periodo durante el cual la estructura se encuentra en buenas condiciones, garantizando de este modo una adecuada inversión de los recursos disponibles.

Es por tanto que se han desarrollado técnicas de mantenimiento y preservación para mejorar la condición actual de las carreteras, con el fin de reducir la tasa de deterioro de la estructura de pavimento y de este modo garantizar un adecuado desempeño durante su vida útil.

La colocación de una sobrecapa asfáltica es una de las técnicas implementadas cuando se tiene un estado severo de agrietamiento por fatiga en la capa superior del pavimento, pero la estructura debajo de la misma aún posee capacidad estructural. Con la finalidad de garantizar un aumento en la vida útil de la estructura de pavimento, se recomienda colocar geosintéticos entre la capa vieja y la nueva con el fin de retardar el reflejo de grietas por fatiga, ya que estos

reducen los esfuerzos concentrados en las discontinuidades de las grietas existentes y generan menores deflexiones, ante las solicitudes del tránsito.

La utilización de geosintéticos en la rehabilitación de pavimentos podría generar un mejor desempeño estructural de la nueva sobrecapa asfáltica, reduciendo los costos de inversión. Por lo que es importante el desarrollo de investigaciones que permitan comprender la mecánica del funcionamiento de estos materiales.

La importancia de este proyecto se puede evidenciar con los resultados obtenidos de los ensayos físicos, químicos y mecánicos realizados al geosintético, a partir de los cuales se puede determinar el comportamiento mecánico del geotextil y por ende su aporte en sobrecapas asfálticas construidas con este material. Esta investigación es un insumo en la generación de manuales de construcción, diseño y especificaciones técnicas.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Evaluar con base en datos experimentales, la influencia de la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en las propiedades químicas y mecánicas del geotextil.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de temas relacionados con las propiedades químicas y mecánicas adecuadas para el uso de geotextiles en la rehabilitación de pavimentos.
- Determinar las propiedades químicas y mecánicas del geotextil mediante ensayos de laboratorio.
- Realizar un análisis termodinámico para determinar la variación de las propiedades del geotextil bajo la interacción de ligante asfáltico.
- Determinar el efecto de la temperatura y la impregnación en la capacidad a tensión del geotextil.

## 1.3. Antecedentes

Para que el pavimento tenga un funcionamiento adecuado es importante que a nivel estructural tenga un comportamiento monolítico (como un solo bloque), tal como lo indica el Instituto del Asfalto (2010). Por esta razón al colocar una sobrecapa asfáltica es necesaria la presencia de una sustancia que adhiera la capa existente con la nueva, para lo cual se utiliza generalmente una emulsión asfáltica o ligante asfáltico. Según Loría (2008), una mala adherencia entre capas puede influir directamente en la falla prematura del pavimento.

Las operaciones con geotextiles en la pavimentación a menudo se producen por encima de la temperatura de fusión del material. Una investigación elaborada por Pikering, Ramanujan y Bullen (2001), demuestra que un geotextil de poliéster es capaz de cumplir los criterios de rendimiento para temperaturas de hasta 180 °C, mientras que uno de polipropileno funciona satisfactoriamente alrededor de (140-145) °C, por lo que este es adecuado cuando se coloca sobrecapa sin superar dicha temperatura. Un estudio similar realizado por Norambuena, Zamora, Castro y Vega (2009), donde se realizaron ensayos vertiendo sobre el geosintético extendido una capa de mezcla bituminosa en caliente entre (135-165) °C, avala al poliéster respecto al polipropileno, ya que los resultados demostraron que los geosintéticos compuestos estructuralmente por un alto contenido polimérico de polipropileno, tienden a adquirir con mayor facilidad el calor que se les transmite por convección, mientras que los de poliéster tardan más en realizar la misma captación.

La temperatura, la presión de oxígeno y la exposición a medios acuosos afecta las fibras de los geotextiles de polipropileno. Esto fue estudiado por Richaud, Farcas, Divet y Benneton (2008) quienes determinaron que estos factores pueden causar un envejecimiento acelerado e indican que la resistencia a la oxidación térmica define el comportamiento a largo plazo del material. Las pruebas a temperaturas moderadas (80 °C) en las que el envejecimiento se acelera por la alta presión de oxígeno y la inmersión en un medio acuoso son las que tienen una mayor afectación.

Norambuena, González, Fernández y López (2016) indican que el daño de las fibras de los geosintéticos puede ser causado por dos razones: el efecto mecánico por extensión y compactación de la mezcla asfáltica y el efecto térmico debido a altas temperaturas de

colocación de la mezcla (150 °C). Dicha investigación sugiere considerar revestimientos térmicos superficiales para proteger las fibras geosintéticas contra las altas temperaturas.

Correia y Bueno (2001) evaluaron mecánicamente muestras de geotextiles no tejidos de poliéster y polipropileno impregnadas de emulsión asfáltica. De los ensayos de tracción se obtuvo un aumento significativo en la resistencia. Las pruebas de transmisión de vapor de agua demostraron que la emulsión asfáltica catiónica permite una drástica reducción en los valores de permeabilidad convirtiendo los geotextiles no tejidos en una barrera de baja permeabilidad. Delbono y Guidice realizaron un estudio similar donde la emulsión asfáltica modificó las propiedades de los geotextiles y redujo su temperatura de fusión. Por lo tanto, la temperatura de instalación de mezclas de asfalto es un aspecto importante a considerar para la correcta instalación de geosintéticos.

El deterioro desde el punto de vista térmico y morfológico ha sido estudiado por Norambuena y González (2015) quienes determinaron posterior al proceso de instalación las fibras geosintéticas se dañan después en mayor o menor grado dependiendo del tipo de geosintético, por lo que las fibras de los geosintéticos pueden ser dañadas debido a fuerzas de aplastamiento y de cizallamiento producidas por los agregados de asfalto.

Es importante observar que los estudios realizados para determinar el efecto que tiene la temperatura sobre el material geosintético es reciente y en Costa Rica no se tiene una normativa actualizada que involucre este factor, por lo que el conocimiento en el tema sigue estando en desarrollo y se espera con esta investigación poder ampliar más en el tema.

## 1.4. Delimitación del problema

### 1.4.1. Alcance

En este proyecto se va a realizar una evaluación química y mecánica únicamente del material geotextil no tejido de polipropileno, dejando las geomallas y geocompuestos, que también se utilizan en la repavimentación, para posteriores investigaciones.

Comúnmente, en la técnica de sobrecapas asfálticas el geotextil se impregna con emulsión asfáltica (Emulsión Asfáltica Catiónica de Rotura Rápida Tipo 1, CRS-1, para el caso de Costa Rica), en este proyecto se va a utilizar tanto la emulsión como el asfalto recuperado, ya que la

primera es trabajable a temperaturas máximas de 80 ºC pues a temperaturas mayores se evapora el agua y se produce la rotura, mientras que el segundo se puede llevar a temperaturas mayores simulando el efecto térmico que tiene la mezcla asfáltica sobre el material.

Para evaluar las propiedades químicas del geotextil no tejido de polipropileno se van a efectuar los ensayos de Análisis Termogravimétrico (TGA), Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y Goniometría. El ensayo mecánico de tensión GRAB se va a realizar tanto con para el geotextil en su condición original como impregnado con emulsión asfáltica. Además, para evaluar las propiedades físicas del geotextil se va a realizar el ensayo Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

### 1.4.2. Limitaciones

No se cuenta con normas de ensayo para las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y para la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) por lo que los materiales se caracterizan y evalúan de acuerdo a los antecedentes hallados o a referencias bibliográficas.

Los ensayos se realizan bajo un ambiente controlado de laboratorio, donde el geotextil no se va a exponer a factores distintos de la temperatura como las fuerzas de aplastamiento y de cizallamiento producidas por los agregados al extender y compactar la mezcla asfáltica donde el geotextil podría sufrir rasgaduras, por lo que los resultados son exclusivamente de laboratorio y puede que el comportamiento de los geotextiles no refleje las condiciones reales en el campo.Se depende de los geotextiles de la compañía Maccaferri y de la emulsión fabricada por RECOPE (Refinadora Costarricense de Petróleo S.A.) para realizar los ensayos por lo que podría existir variabilidad entre los materiales y en consecuencia tener variaciones en los resultados.

## 1.5. Metodología

En la Figura 1 se detalla la metodología de diseño desarrollada a partir de 4 fases:

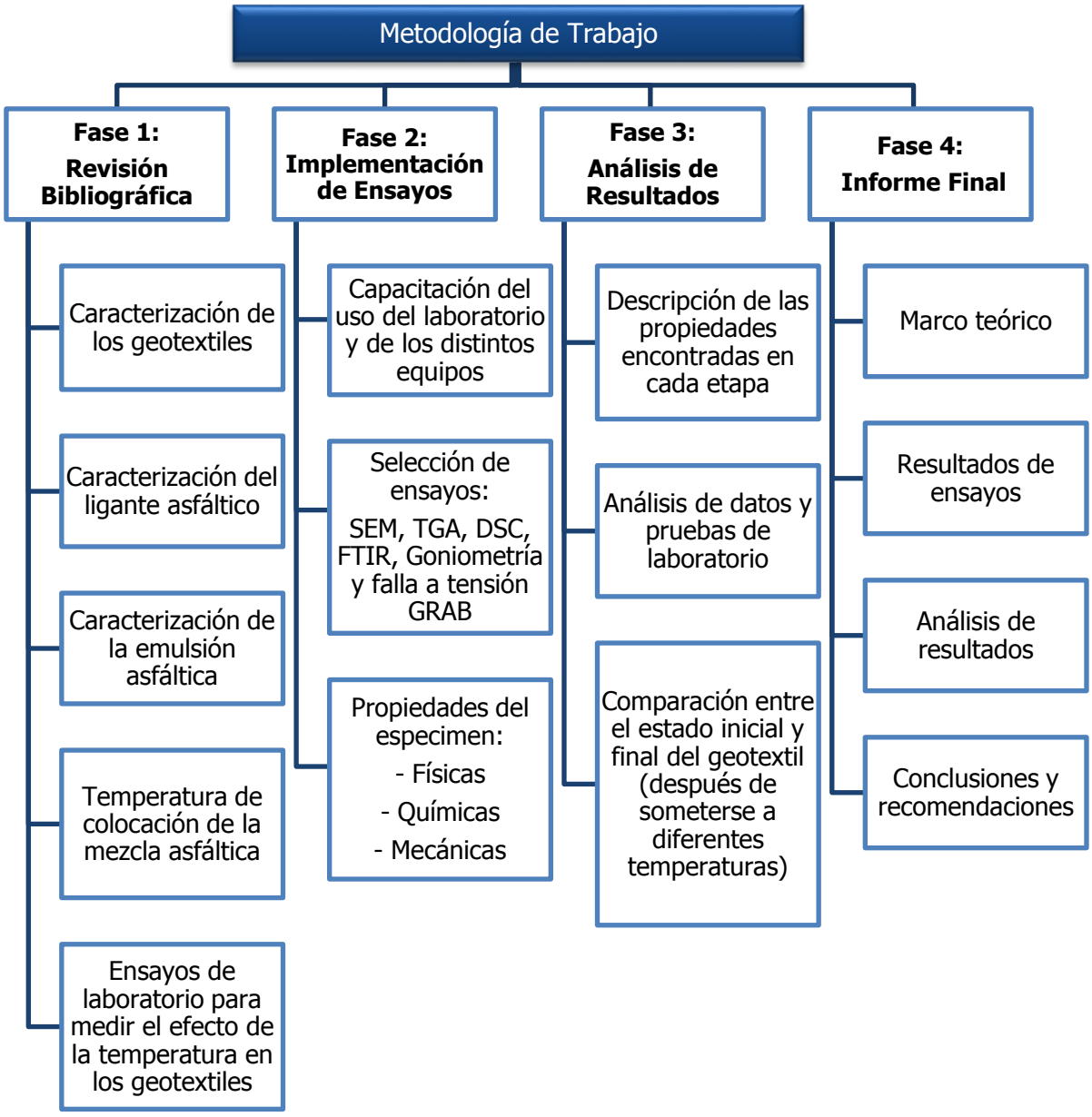



Figura 1. Metodología propuesta para desarrollar la investigación

### 1.5.1. Fase 1: Revisión bibliográfica

En esta fase se realizó una consulta bibliográfica exhaustiva sobre las propiedades químicas y mecánicas que caracterizan el geotextil no tejido de polipropileno, utilizado en la repavimentación para la rehabilitación de carreteras. Además, se investigó sobre las distintas normativas que establecen los parámetros que debe cumplir el material para ser utilizado y el proceso de colocación del geotextil.

Se investigó lo referente a ligantes asfálticos y emulsiones asfálticas tanto sus características como la dosificación empleadas en la técnica de sobrecapa asfáltica con geotextiles, con el fin de llevar el ensayo a una condición similar a la del campo. Asimismo, se indagó sobre la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica con el fin de llevar el geotextil a esa condición térmica.

Para caracterizar química y mecánicamente el geotextil no tejido se estudiaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)
- Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)
- Análisis Termogravimétrico (TGA)
- Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)
- Goniometría
- Resistencia a la tensión GRAB

### 1.5.2. Fase 2: Implementación de ensayos

Se recibió una capacitación acerca del uso del laboratorio, así como de la utilización de los equipos para los distintos ensayos.

En Costa Rica el asfalto se caracteriza por su grado de viscosidad y el único que se encuentra disponible es el AC-30, por lo que para este proyecto ese es el que se utilizó. De igual manera se usó emulsión catiónica de rotura rápida CRS-1. Ambos producidos por RECOPE (Refinadora Costarricense de Petróleo S.A.), cuyos productos están normados bajo el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22:04, donde se establece las especificaciones mínimas de calidad, así como los métodos de ensayo que deben cumplir los asfaltos, cementos asfálticos y emulsiones asfálticas utilizados en la construcción y tratamiento de pavimentos.

A partir de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se detalla la morfología del geotextil, así como su arreglo estructural espacial. El Análisis Termogravimétrico (TGA) y la Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) se emplearon para determinar el efecto térmico del geotextil ante un barrido de temperaturas, con la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) se verifica la calidad de la muestra y su identidad química. Para determinar la adhesión entre el sistema geotextil-ligante asfáltico se utilizó el ensayo de Goniometría. También, se

realizó un ensayo de Resistencia a la tensión GRAB, con el fin de determinar si las características mecánicas del material varían con la exposición a la temperatura y evaluar el desempeño del geotextil. Un resumen de los ensayos se encuentra en el Cuadro en la sección de Apéndice.

En la Figura 2 se muestra el orden de los ensayos por etapas.

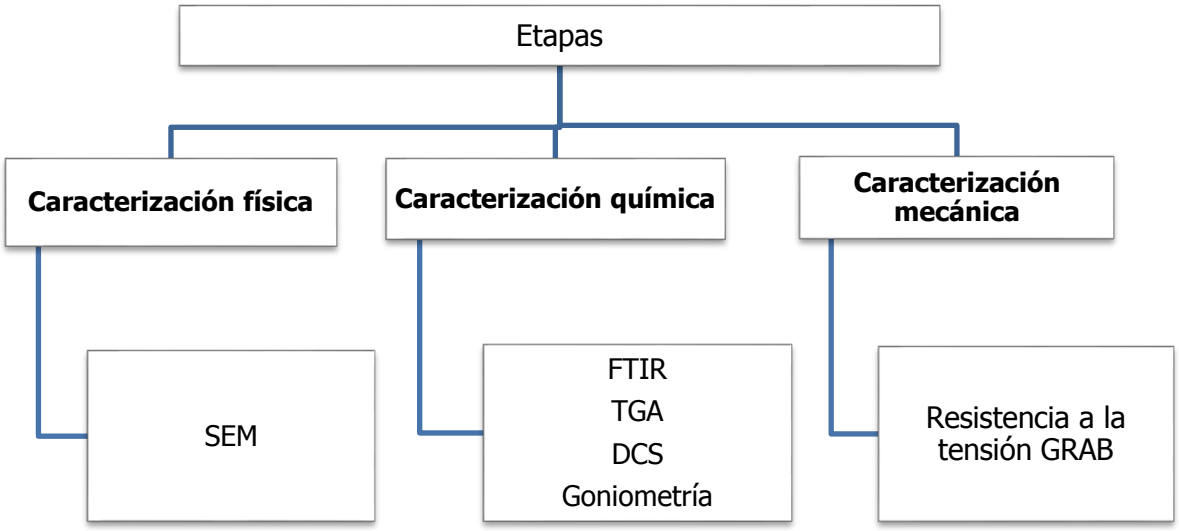



Figura 2. Ensayos por realizar en cada etapa

### 1.5.3. Fase 3: Análisis de resultados

Inicialmente, se describen las propiedades físicas del geotextil no tejido encontradas a través del ensayo de SEM, después se detallan las propiedades químicas encontradas durante la implementación de ensayos TGA, DSC, FTIR y goniometría. Luego se realiza un análisis termodinámico con el fin de determinar la afectación que sufre el geotextil ante las altas temperaturas.

Por último, a través del ensayo de tensión GRAB, se compara el geotextil sin impregnar y el geotextil impregnado para determinar su cambio en la resistencia a tracción, y concluir si la temperatura tiene una afectación importante sobre el geotextil tal que se afecte su capacidad a tensión y no provea la funcionalidad deseada en la rehabilitación del pavimento, afectando su desempeño.

### 1.5.4. Fase 4: Informe final

A partir de la información recopilada y de los resultados obtenidos se realiza un informe técnico, en el cual se detalla la información relevante respecto al efecto que tiene la temperatura sobre el geotextil obtenida de los distintos ensayos y las conclusiones generadas de la comparación de resultados. Asimismo, se brinda recomendaciones adicionales para futuras investigaciones.

# Capítulo II. Marco teórico

## 2.1. El reflejo de grietas en pavimentos

Con la colocación de sobrecapas asfálticas se pretende rehabilitar el pavimento flexible devolviéndole características funcionales y estructurales, sin embargo, esta técnica muchas veces no muestra los resultados esperados, ya que es común que se dé el fenómeno de agrietamiento reflexivo. Dicho fenómeno consiste en la propagación de grietas de la capa inferior hacia la capa superior, deteriorando nuevamente la superficie del pavimento y disminuyendo su vida útil.

Tal como lo indica Colombier (2005), el reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas es el resultado de los esfuerzos ocasionados por las cargas de tráfico y los efectos climáticos (precipitación y temperatura), los cuales producen una gran variedad de tensiones en la nueva capa de mezcla asfáltica. Dentro de los factores que intervienen en la creación de fisuras están:

- Fatiga: daño debido a la aplicación de cargas repetitivas de tránsito después de un determinado número de ciclos. La ruptura del pavimento se da debido a esfuerzos de tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica.
- Contracción: encogimiento que se da en una de las capas del pavimento, siendo impedido por la fricción de la capa subyacente, por lo que se generan esfuerzos a tensión mayores a su resistencia a tracción, generando fisuras. Las grietas de contracción ocurren principalmente cuando se tiene una capa tratada con cemento, donde la variación de la temperatura provoca que se expanda y contraiga, sin embargo, en climas severos el fenómeno también puede afectar a la capa bituminosa.
- Movimiento de la subrasante: movimiento vertical u horizontal inducido por fenómenos como el deslizamiento del suelo, la pérdida de capacidad soportante por un aumento en el contenido de humedad, un lento asentamiento por falta de compactación de la capa o por contracción de suelo arcilloso por la pérdida excesiva de humedad. Debido a que la estructura descansa sobre el suelo se originan grietas que se propagan a través de las diversas capas del pavimento.

- Defectos constructivos: las grietas se dan por errores en el diseño del pavimento, así como prácticas constructivas deficientes en la colocación de las capas de pavimento, inadecuada continuidad de las juntas longitudinales y falta de adherencia entre capas.
- Envejecimiento y exposición ambiental: a través del tiempo el pavimento se envejece lo que causa una rigidización del mismo, con la exposición a ambientes fríos en la capa superior se da una combinación de contracción térmica y deformación del pavimento provocando grietas que comienzan en la superficie de desgaste.

Según Colombier (2005) el desarrollo de una grieta existente a una capa superpuesta se da en las siguientes tres etapas:

- Etapa de iniciación: se induce una grieta en la capa superior por un defecto ya presente en la capa inferior.
- Fase de propagación: la grieta se transfiere lentamente a través del espesor total de la capa, partiendo desde el punto en que fue inducida por una concentración de esfuerzos.
- Fractura o etapa final: la grieta aparece en la superficie de la capa.

El posible camino de propagación de una grieta existente ha sido descrito por Goacolou y Marchand (1982) el cual se describe visualmente en la Figura 3.

Existen técnicas para retardar el reflejo de grietas hacia la nueva sobrecapa asfáltica, de acuerdo con Button & Lytton (2015) y Loría (2008) algunas de las técnicas más comúnmente utilizadas son:

- Aumentar el espesor de la sobrecapa.
- Incorporar fibras de poliéster o polipropileno, o bien caucho molido a la mezcla asfáltica.
- Modificar el asfalto con caucho, polímero, sulfuro o carbón.
- Rejuvenecer la carpeta existente antes de colocar la sobrecapa.
- Utilizar sistemas intercapas de alivio de esfuerzos (SAMI, siglas en inglés) como el caucho, redes de acero o geosintéticos.

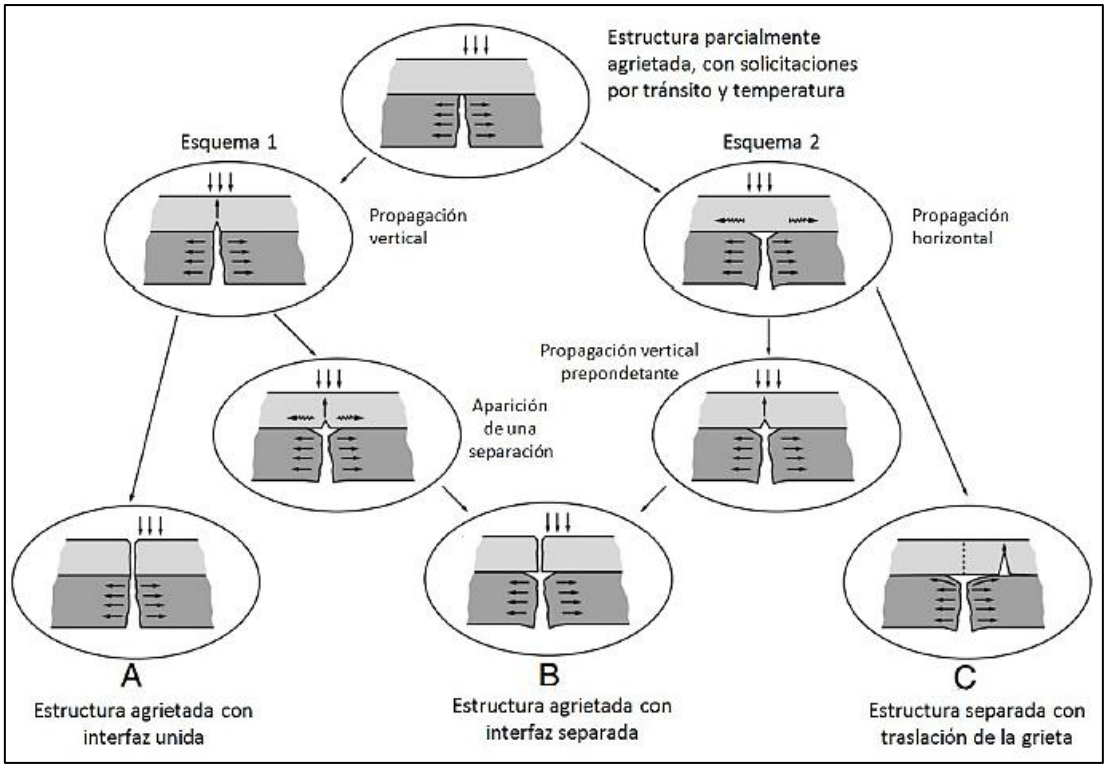



Figura 3. Propagación de la grieta

Fuente: Lefort, Sicard, & Merrien, 1999

## 2.2. Geosintéticos en la repavimentación

Según la norma ASTM D4439, se define geosintético como "un producto plano fabricado a partir de materiales poliméricos, para ser usado con suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre".

Los geosintéticos utilizados en las sobrecapas asfáltica actúan como una membrana de absorción de esfuerzos, la cual reduce las tensiones transferidas a la nueva capa asfáltica. Según Pereira (2002), el material actúa como un plano de debilidad justamente en la interfaz donde ocurre la mayor concentración de esfuerzos de tensión, debilitando suficientemente el vínculo de transmisión de esfuerzos entre la capa superior y la capa deteriorada, si la energía generada no es la suficiente para propagar la grieta en el geosintético ésta se redirecciona al plano horizontal del pavimento.

Los geosintéticos más utilizados como sistema intercapa en el proceso de repavimentación son los geotextiles, las geomallas y los geocompuestos. Estos están asociados a funciones de separación, refuerzo, filtración, drenaje y barrera, lo cual se puede observar en Cuadro 1.

Cuadro 1. Funciones desarrolladas por los distintos tipos de geosintéticos

| Tipo | Función | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Separación | Refuerzo | Filtración | Drenaje | Barrera |
| Geotextil | Sí | Sí | Sí | Sí | No |
| Geomallas | No | Sí | No | No | No |
| Geored | No | No | No | Sí | No |
| Geomembrana | No | No | No | No | Sí |
| Geosintéticos con revestimientos de arcilla | No | No | No | No | Sí |
| Geocompuestos[1] | Sí | Sí | Sí | Sí | Sí |

[1]Depende del tipo de materiales que lo componen

Fuente: Koerner (1999)

Para el caso de rehabilitaciones de sobrecapas asfálticas con geosintéticos, se tiene dos mecanismos principales: el refuerzo y el alivio de esfuerzos. El primero de estos según Sudersanan, Rajagopal y Veeraragavan (2014) se refiere a la acción de disipar la energía almacenada, cambiando la dirección de la grieta por medio de la resistencia a la tensión y retardando la propagación de la misma hacia la capa superior. El segundo de acuerdo con Dempsey (2002) mitiga el problema del reflejo de grietas en las sobrecapas asfálticas.

De acuerdo con Koerner (1999) el sistema de intercapa con geosintéticos mejora el desempeño del pavimento y es más económico que el uso de materiales tradicionales para solucionar el fenómeno de reflejo de grietas.

### 2.2.1. Tipos de geosintéticos utilizados en sobrecapas asfálticas

Para rehabilitaciones de pavimentos con sobrecapas asfálticas los geosintéticos de uso común (debido a sus características) son los geotextiles, geomallas y geocompuestos, los cuales se describen a continuación:

Geotextiles

La norma ASTM D4439 define geotextil como un geosintético compuesto de textiles con la finalidad de separar, filtrar, drenar, reforzar y proteger. De acuerdo con García, López, Hernández, Sánchez y Trujillo (2015) el geotextil es un material textil permeable, a base de polímero ya sea natural o sintético y este puede ser tejido (con hilos entrecruzados en máquinas de tejer), tal como se muestra en la Figura 4a o no tejido (de fibra cortada o filamento continuo,

ligados de manera mecánica mediante agujas o por adhesión usando calor o resinas), tal como se puede observar en la Figura 4b.

Figura 4. Geotextiles para sobrecapas (a) tejidos y (b) no tejidos
Fuente: Leiva, 2016

El tipo de geotextil que se recomienda para sobrecapas asfálticas es el no tejido ya que este posee características de material filtrante, drenante, separador y absorbente, el cual retiene la emulsión y forma una membrana. Los tejidos no tienen capacidad para retener la emulsión por lo que no forma la barrera permeable que se requiere.

Los geotextiles de polipropileno poseen facilidad para absorber la emulsión y requieren un menor costo de producción, no obstante, presenta un punto de fusión y contracción bajos, lo que lo hace susceptible a daños por temperaturas altas durante la instalación. Los geotextiles de poliéster presentan puntos de fusión y contracción mayores, sin embargo, su costo es mayor. (Leiva, 2016)

Geomallas

Las geomallas o geogrillas según la norma ASTM D35 son "un geosintético usado para refuerzo, formado por una retícula regular de elementos resistentes a la tensión, con una abertura de tamaño suficiente que permite el anclaje del suelo circulante, piedra u otros materiales geosintéticos". Estas se pueden observar en la Figura 5.

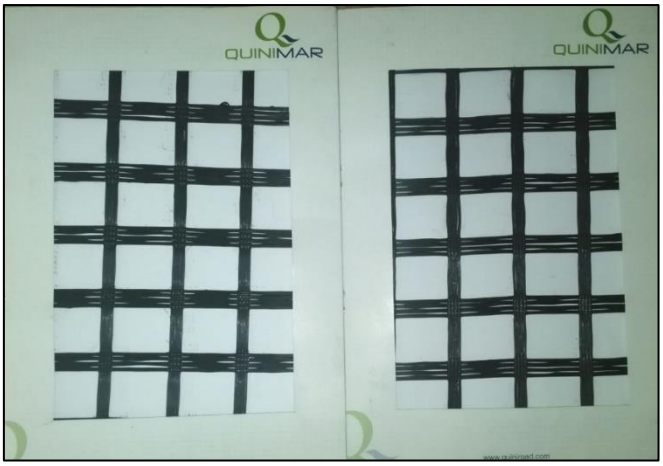



Figura 5. Geomallas para sobrecapas

La función principal de las geomallas es el aumento de la resistencia a la tracción de la carpeta asfáltica, distribuyendo de este modo los esfuerzos horizontales en un área mayor, lo que aumenta la durabilidad de los pavimentos al retardar la aparición de grietas (Beltrán, 2013).

Geocompuestos

Un geocompuesto es la combinación entre dos o más tipos de geosintéticos, un ejemplo de este se puede observar en la Figura 6. Para el caso de repavimentación se utiliza una mezcla entre el geotextil y la geomalla, aportándole propiedades de separación y mayor resistencia a la tensión respectivamente.

Figura 6. Geocompuesto para sobrecapas

La selección del geosintético a utilizar en las labores de repavimentación depende de parámetros como las características mecánicas del geosintético, el tipo de mezcla asfáltica, la impregnación de ligante en el material, la estructura de la superficie y del proceso constructivo que sea implementado. (Solano, 2016). Para el caso de este proyecto se van a utilizar los geotextiles no tejidos.

### 2.2.2. Propiedades de los geosintéticos en la repavimentación

De acuerdo con Naranjo (2003) la gran mayoría de los geosintéticos son fabricados con polímeros, es decir, "a nivel molecular están conformados por unidades o paquetes de carbono e hidrógeno junto con otros elementos como el cloro en diferentes combinaciones."

Las propiedades de cada polímero se definen según la unidad básica que se repite a lo largo de estas cadenas, dando origen a los siguientes productos:

- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Cloruro Polvinílico (PVC)
- Poliéster (PET)
- Poliestireno (PS)
- Poliamida (PA)

El tipo de polímero tiene influencia directa sobre el comportamiento ante temperatura del geosintético, ya que este define su punto de fusión. Por lo general, los geotextiles se elaboran con polietileno, polipropileno y/o poliéster (Koerner, 1999). De acuerdo a la disponibilidad en el mercado se va a utilizar un geotextil no tejido de polipropileno, cuyo material se describe a continuación:

Polipropileno (PP): es un plástico muy duro y resistente, opaco, con un punto de fusión alrededor de 150 ºC. Es resistente a los golpes, tiene poca densidad y es fácil de doblar. Además, es resistente a la corrosión y compatible con todo tipo de cementos y aditivos, por lo que se utiliza en la construcción de materiales geosintéticos. (Díaz, Escobar y Olivo, 2009)

Tal como lo explica Delbono (2014), el polipropileno utilizado en la fabricación de geotextiles es una fibra formada por macromoléculas lineales de hidrocarburos alifáticos saturados, en los que un carbono de cada dos lleva una ramificación metilo en disposición isostática y sin otra sustitución. Su composición química se muestra en la Figura 7.

Los geotextiles no tejidos deben cumplir con los parámetros de calidad del Cuadro 2.

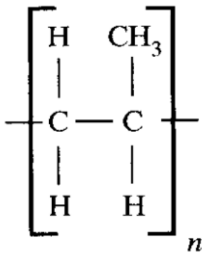


Figura 7. Estructura molecular del polipropileno usado en la manufactura de geosintéticos
Fuente: Koerner, 1999

Cuadro 2. Propiedades requeridas por los geotextiles no tejidos para la prevención del reflejo de grietas

| Propiedad | Ensayo | Unidades | Valor Mínimo Promedio por Rollo (VMPR) |
|---|---|---|---|
| Resistencia a la tensión GRAB. | ASTM 4632 | N | 445 |
| Masa por unidad de área | ASTM D 5261 | g/m$^2$ | 140 |
| Elongación última | ASTM D 4632 | % | 50 |
| Retención asfáltica | ASMT D 6140 | l/m$^2$ | 0,9 |
| Punto de fusión | ASTM D 276 | °C | 162 |
| Resistencia hidráulica a reventamiento | ASMT D 3786 | psi \| kPa | 200\|1379 |

Fuente: Departamento de Transportes de Caltrans, 2010

Además, el Programa Nacional de Evaluación de Productos de Transporte (NTPEP, por sus siglas en inglés) establece los requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en proyectos de repavimentación tanto para carreteras de bajo tránsito como de alto tránsito. Dichos parámetros se muestran en el Cuadro 3 y en el Cuadro 4, respectivamente.

Cuadro 3. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de bajo volumen

| Propiedad | Normas de ensayo | Unidades | Resultados |
|---|---|---|---|
| Resistencia al agarre | ASTM D 4632 | N | 400 |
| Elongación última | ASTM D 4632 | % | 50% en la ruptura |
| Masa por unidad de área (gramaje) | ASTM D 5261 | g/m$^2$ | 122 |
| Tasa de aplicación de ligante asfáltico | Proyecto de investigación LanammeUCR | l/m$^2$ | 0,70-0,80 |
| Punto de fusión | ASTM D 276 | °C | 160 |
| Resistencia a rayos UV | ASTM D 4355 | % | 70 en 150 horas |

Fuente: NTPEP, 2016 (modificado por Solano, 2016)

Cuadro 4. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de alto volumen

| Propiedad | Normas de ensayo | Unidades | Resultados |
|---|---|---|---|
| Resistencia al agarre | ASTM D 4632 | N | 449 |
| Elongación última | ASTM D 4632 | % | 50% en la ruptura |
| Masa por unidad de área (gramaje) | ASTM D 5261 | $g/m^2$ | 139 |
| Tasa de aplicación de ligante asfáltico | Proyecto de investigación LanammeUCR | $l/m^2$ | 0,90-1,0 |
| Punto de fusión | ASTM D 276 | °C | 160 |
| Resistencia a rayos UV | ASTM D 4355 | % | 70 en 150 horas |

Fuente: NTPEP, 2016 (modificado por Solano, 2016)

Durante la técnica de repavimentación se debe de colocar un ligante asfáltico con el fin de asegurar la adherencia entre la superficie del pavimento existente y la sobrecapa asfáltica, generalmente se utiliza emulsión asfáltica o asfalto rebajado, sin embargo, si se utilizan geosintéticos de polipropileno el asfalto rebajado no puede ser utilizado, ya que se pueden dar reacciones a altas temperaturas.

La sustancia utilizada como ligante forma una baja conductividad hidráulica que mejora la unión del geotextil con la nueva capa de pavimento y garantiza un adecuado desempeño del sistema. Debido a esto, es importante determinar la dosis apropiada de ligante asfáltico a colocar.

## 2.3. Emulsión asfáltica

El asfalto es un material complejo desde el punto de vista químico obtenido como el residuo en el proceso de refinación del petróleo crudo. En pavimentos este funciona como ligante, el cual aportan resistencia estructural y textura a las capas, contiene propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad. (Rodríguez, Castaño y Martínez, 2001)

De acuerdo con el Instituto del Asfalto (2010), "cuando el asfalto es mecánicamente separado en partículas microscópicas y dispersado en agua con un agente emulsivo, se convierte en una emulsión asfáltica". Estas pueden tener aditivos estabilizantes, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura.

Otra definición es dada por el "Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, CR-2010" del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica, quien define emulsión asfáltica como: "Es un sistema heterogéneo que normalmente contiene dos fases inmiscibles (asfalto y agua) en donde el agua forma la fase continua de la emulsión y pequeños glóbulos de asfalto forman la fase discontinua. La emulsión de asfalto puede ser de tipo aniónico (glóbulos cargados negativamente) o catiónica (glóbulos cargados positivamente), dependiendo del agente emulsionante".

Para el caso de Costa Rica se utiliza CRS-1, es decir, una emulsión catiónica (partículas de asfalto cargadas positivamente que se mueven hacia el cátodo), de rompimiento rápido (poca o ninguna capacidad para ser mezclada con un agregado) y de baja viscosidad, debido a las condiciones climáticas del país. (Solano, 2011)

### 2.3.1. Dosificación de emulsión asfáltica en repavimentación con geotextiles

Smith (1983) propone que la cantidad óptima de ligante puede ser determinada a través de la ecuación empírica siguiente:

$$RTC = 0{,}05(TW)^{0{,}30} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$RTC$: dosis de riego de liga recomendada [gal/yd$^2$]
$T$: espesor del geosintético [mils]
$W$: peso del geosintético [oz/yd$^2$]

Koerner (1999) menciona que la cantidad de ligante de diseño se determina de acuerdo con la Ecuación 2, la cual proviene de un trabajo presentado por Button (1982):

$$Q_d = 0{,}362 + Q_s + Q_c \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

$Q_d$: cantidad de ligante según diseño [l/m$^2$]
$Q_s$: cantidad de ligante necesario para lograr la saturación del geotextil [l/m$^2$] (suministrado por el fabricante en las especificaciones del material)

$Q_c$: Valor de corrección dependiendo de las condiciones de la superficie del pavimento asfáltico existente (se encuentra entre 0,09 l/m$^2$ para superficies niveladas hasta 0,59 l/m$^2$ para superficies porosas y oxidadas)

El valor de $Q_c$ recomendado según la condición del pavimento se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Demanda de sellador de la superficie de pavimento asfáltico

| **Condición de la superficie** | **$Q_c$ (l/m$^2$)** |
|---|---|
| Nivelada | 0-0,09 |
| Lisa no porosa | 0,09-0,23 |
| Ligeramente porosa, ligeramente oxidada | 0,23-0,50 |
| Ligeramente porosa, oxidada | 0,36-0,50 |
| Muy porosa, oxidada | 0,50-0,59 |

Fuente: Koerner, 2005 (Modificado por Solano, 2016)

Otro factor que determina la cantidad óptima de ligante asfáltico a utilizar para evitar posibles problemas de exudación e incluso la generación de una superficie de deslizamiento, es la capacidad de absorción del geotextil, por lo que se recomienda las tasas de aplicación de ligante asfáltico que se muestran en el Cuadro 6 según el geotextil a utilizar.

Cuadro 6. Tasas de aplicación de ligante asfáltico según gramaje del geotextil no tejido

| **Gramaje (peso nominal) (g/m$^2$)** | **Ligante asfáltico residual (l/m$^2$)** |
|---|---|
| 120 | 0,60-0,80 |
| 140 | 0,80-1,00 |
| 150 | 0,80-1,00 |
| 180 | 1,00-1,20 |
| 200 | 1,10-1,30 |
| 205 | 1,20-1,40 |

Fuente: MACCAFERRI, 2015

## 2.4. Metodología constructiva para la rehabilitación con sobrecapas asfálticas utilizando geosintéticos

Para lograr un desempeño óptimo del sistema de sobrecapa asfáltica con geotextil es necesario garantizar una técnica adecuada de construcción, por lo que a continuación se describe una

metodología constructiva para esta práctica de acuerdo con Koerner (2005), MACAFERRI (2010) y PAVCO (2012).

### 2.4.1. Materiales

Geotextil

Se utiliza geotextil no tejido de polipropileno punzonado por agujas, ya que este material tiene la capacidad de absorber ligante asfáltico y adherirse a la capa ya existente y a la sobrecapa, funcionando como un único sistema. Además, su punto de fusión ronda los 150 °C y su punto de reblandecimiento es alrededor de los 160 °C, lo que le permite trabajar en aplicaciones de pavimentación asfáltica en caliente, donde las temperaturas de contactos se encuentran entre los 140 °C y 160 °C.

El geotextil conforma una barrera viscoelastoplástica, lo que le permite trabajar como barrrera impermeabilizante y amortiguar los esfuerzos a los que está sometida la capa asfáltica, retardando de este modo el reflejo de grietas. Es necesario que el geotextil a usarse como sistema intercapa cumpla con los requerimientos mínimos mostrados en el Cuadro 2, el Cuadro 3 y el Cuadro 4 de la sección 2.2.2 del presente documento.

Ligante asfáltico

Durante la aplicación de esta técnica se debe de colocar un ligante asfáltico para saturar el geotextil, con el fin de asegurar la adherencia entre la superficie vieja del pavimento y la sobrecapa.

La sustancia utilizada como ligante forma una baja conductividad hidráulica que mejora la unión y permite formar un sistema unicapa. Esta sustancia puede ser un cemento asfáltico de penetración (60-70) mm/10 (AC-5 o AC-20), emulsión asfáltica catiónica (CRS-2 o CRS-1h) o emulsión asfáltica aniónica (RS-2 o RS-1). (Solano, 2016)

Para asegurar la adherencia entre capas y garantizar el desempeño adecuado del sistema es importante la determinación de las dosis apropiadas del riego de ligante asfáltico, la cual varía desde (0,1 a 2,3) $l/m^2$, dependiendo de la porosidad del pavimento existente y la capacidad de absorción del geotextil. El curado tarda de 30 minutos a 4 horas, el cual depende de la temperatura, la humedad y del tipo de ligante asfáltico a emplear. (Solano, 2016)

### 2.4.2. Equipo

Para llevar a cabo esta técnica se utiliza el mismo equipo requerido en una repavimentación común de capas asfálticas: perfiladora de ancho variable, equipo de corte o sierra, barredora mecánica, cepillo y escoba, equipo de aire a presión, codal o escantillón, distribuidor de asfalto con aspersores o tanqueta, vagonetas, termocupla, pavimentadora, rastrillos de nivelación, compactador vibratorio de rodillo y compactador de llanta de hule.

Según el "Manual de Criterios generales para proyecto, especificación y aplicación de geosintéticos" de MACAFERRI (2010), se debe albergar el material asfáltico en un depósito adecuado con sistema completo, con bomba de circulación, donde se pueda calentar la sustancia de forma adecuada y uniforme. La capacidad del depósito debe de ser compatible con el consumo requerido por día de la obra.

Además, es recomendable que el camión distribuidor de emulsión asfáltica posea sistema de calentamiento, bomba de presión regulable, barra de distribución de circulación plena y dispositivos de regulación horizontal y vertical, boquilla de distribución calibrados para la aspersión en abanico, tacómetros, manómetros y termómetros de fácil lectura y manguera de operación manual para la aplicación en sitios donde no es accesible para la barra del camión.

La instalación del rollo geotextil se puede realizar manual o mecánicamente con equipo adecuado para su instalación. Para una instalación manual se requiere una cuadrilla de tres personas (dos manteniendo la alineación del rollo y desenrollándolo, y otra persona cepillando sobre el geotextil, eliminando al máximo las arrugas). Se debe ser capaz de colocar el material de manera uniforme y con cuidado de producir la menor cantidad de arrugas. Además, se requiere herramientas como escobas de cerda rígidas o rodillos para uniformizar la superficie, tijeras o cuchillas para poder cortar el material y cepillos para aplicar el sellador asfáltico a los traslapos. (PAVCO, 2012)

### 2.4.3. Construcción

De acuerdo con Koerner (2005) en su libro "Diseñando con Geosintéticos", MACAFERRI (2010) en el "Manual de Criterios generales para proyecto, especificación y aplicación de geosintéticos" y PAVCO (2012) en el "Manual de Diseño con Geosintéticos", se describe el procedimiento que

se debe seguir al construir sobrecapas asfálticas con el uso de geotextiles, de manera tal que se prevenga la reflexión de grietas en el pavimento flexible.

Condiciones generales según Koerner (2005)

Para obtener el mejor desempeño de esta técnica de sobrecapas asfálticas en una vía terrestre es necesario realizar las siguientes medidas preliminares:

- No se debe de realizar este tipo de obra durante días de lluvia o bajo riesgo de lluvia, la presencia de agua en la superficie de trabajo genera problemas de adherencia y daño por humedad en la mezcla asfáltica.
- Se debe corregir cualquier tipo de imperfección, depresiones, deformaciones o agrietamiento en la superficie de trabajo, para esto se puede perfilar la capa de pavimento existente.
- Para garantizar la adhesión del material geosintético a la capa de rodadura, se debe de asegurar una superficie libre de elementos de suciedad, vegetación, escombros y partículas de polvo. Por esto, se debe de limpiar la pista con escobas mecánicas o manuales y compresores neumáticos de aire.
- Se debe sellar todas las grietas con un material apropiado para este fin, teniendo el cuidado de no sobrepasar el nivel existente. El sello de grietas es únicamente para grietas superficiales, si se tiene un deterioro debido a una falla estructural este se debe intervenir de la manera más adecuada según sea la situación.
- Ningún material asfáltico debe ser instalado a una temperatura ambiente inferior a 10 °C (esta condición no rige en Costa Rica debido a las temperaturas climáticas de la región geográfica donde se ubica).
- La mezcla asfáltica que se va a utilizar para la sobrecapa, se debe de colocar lo más rápido posible sobre el geotextil, a una temperatura de colocación entre 140 °C y 165 °C, para que no dañe el material polimérico.

Condiciones generales para la preparación de la superficie según PAVCO (2012) y Solórzano, Salas, Sequeira y Loría (2005)

Para garantizar una adecuada adhesión del geotextil a la capa de rodadura existente y a la de repavimentación, debe preverse que la superficie sobre la cual se colocarán los rollos esté libre de elementos como polvo, agua, vegetación y escombros que puedan interferir entre la

emulsión asfáltica y la carpeta vieja. Además, antes de la labor de sobrecapas asfálticas se debe garantizar ciertas características del estado del pavimento existente.

Es recomendable seguir las siguientes indicaciones:

- En caso de ser necesario, se deben realizar algunos trabajos preliminares como el bacheo en sitios donde se considere adecuado reestablecer las características de soporte, sello de grietas o un perfilado de la superficie con el fin de eliminar deterioros existentes y proveer una regularidad adecuada. Según James (2004), cuando se utiliza un sistema intercapa, el pavimento existente debe recibir tratamiento de acuerdo a su condición, tal como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Condiciones del pavimento cuando se utilizan sistemas intercapa

| **Tipo de deterioro** | **Comentario** |
|---|---|
| Grietas superficiales | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse |
| Grietas de bloque | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse |
| Grietas longitudinales o transversales | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse |
| Fatiga cuero de lagarto | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse (dependiendo del mecanismo de deformación) |
| Bombeo | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse. Si el bombeo se debe a agua en la base, drenar el suelo antes de la instalación. |
| Ahuellamiento | Nivelar |
| Huecos | Los huecos deben rellenarse |
| Baches | Rellenar y reparar |
| Grietas de borde | Reparar o reconstruir |
| Rellenos | Sellar las grietas entre el pavimento existente y el relleno |

Fuente: James, 2004

- Si se realiza el perfilado, este debe hacerse a temperatura ambiente y sin adición de solventes o productos ablandadores que puedan afectar la granulometría de los agregados o las propiedades del asfalto existente.
- Después de nivelar la superficie, esta se debe secar y limpiar. Para esto se utiliza un equipo de aire a presión que permite eliminar las partículas de la superficie y se

complementa con el barrido manual y mecánico para eliminar las partículas menos gruesas.

Condiciones generales para la aplicación de ligante asfáltico según Koerner (2005), MACCAFERRI (2010) y PAVCO (2012)

La capa de emulsión asfáltica debe ser suficiente para que el geotextil, la capa asfáltica ya existente y la nueva sobrecapa de pavimento asfáltico se unan entre sí y formen un sistema unicapa. Por lo tanto, como ya se ha mencionado, la tasa de aplicación de la emulsión depende de las condiciones en las que se encuentre el pavimento antiguo y de la capacidad de absorción del geotextil a utilizar. Un porcentaje de la emulsión debe colocarse en la superficie existente y otro porcentaje sobre el geotextil, antes de colocar la sobrecapa asfáltica.

A continuación, se presentan las condiciones generales para realizar la aplicación del ligante asfáltico:

- La emulsión o ligante asfáltico no puede ser aplicado en superficies mojadas.
- Se debe mantener una circulación periódica en los depósitos donde se alberga la emulsión, para evitar la sedimentación de la misma.
- La emulsión debe mantenerse en un rango de temperaturas desde los 55 °C hasta los 70 °C, para una mejor trabajabilidad y evitar la rotura antes de lo deseado.
- El ligante debe ser aplicado de una sola vez por todo el ancho del tramo en el que se va a realizar la obra, se debe calibrar adecuadamente la presión de las boquillas, la altura de la barra rociadora y la velocidad del camión.
- La cantidad de ligante teórica a utilizar para garantizar el desempeño de esta técnica, se puede calcular a través de la Ecuación 2. Además, se debe tomar en cuenta la capacidad de absorción del geotextil, por lo que se recomienda prestar atención a las tasas de aplicación de ligante asfáltico que se muestran en el Cuadro 7.

Es importante que las tasas de aplicación del ligante residual se establezcan antes de iniciar el proyecto y que se ajusten en el campo al inicio de la obra, conforme a las condiciones particulares.

- MACCAFERRI (2010) recomienda aplicar de un 70 % a un 80 % de ligante asfáltico a la tasa definida experimentalmente sobre la capa existente, y el restante 30 % o 20 % luego de instalar el geotextil.
- El tiempo de ruptura de la emulsión asfáltica está directamente relacionado con las condiciones climáticas, viento, humedad y temperatura ambiente. Esto puede tardar de 30 min a 4 horas según el tipo de emulsión.

Condiciones generales para la instalación del geotextil según Koerner (2005), MACCAFERRI (2010) y PAVCO (2012)

- No se puede utilizar el geotextil en condiciones mojadas o húmedas. En caso que el material se moje completamente debido a una lluvia cuando ya ha sido instalado, se debe secar totalmente para continuar con la técnica. Se pueden utilizar sopladores con aire a presión para eliminar toda la humedad presente en el material.
- El geotextil se debe colocar cuando se haya verificado la ruptura de la emulsión asfáltica, ya que la presencia de agua entre el material y el pavimento antiguo es dañina para el desempeño de la estructura.
- La instalación del material geosintético puede realizarse de manera manual, siendo necesaria una cuadrilla de tres personas (dos manteniendo la alineación del rollo y desenrollándolo, y una cepillando sobre el geotextil, eliminado al máximo las arrugas que se generen), o con equipo mecánico especializado.
- Se debe tomar todos los cuidados necesarios, para limitar la formación de ondulaciones o arrugas en el material, ya que estas no permitirán que la absorción del asfalto líquido sea suficiente para la formación de la barrera impermeable reduciendo los beneficios a largo plazo de esta membrana de intercapa.
- En caso de que se presenten arrugas se tienen las siguientes recomendaciones:
    - Las arrugas y dobleces de más de 25 mm deberán rasgarse y aplanarse, en sentido del avance de los equipos de pavimentación.
    - Si la arruga o doblez sobrepasa los 50 mm, este exceso deberá ser eliminado.
    - El corte y enmienda del material debe ser por medio de la superposición mínima.
- Las uniones longitudinales y transversales del material deben ser hechas por medio de superposiciones entre de 20 cm y 30 cm de traslapo del geotextil. Se debe evitar superposiciones en las regiones de solicitación de las cargas de tránsito, en caso que

no se pueda evitar se debe aplicar una tasa más de ligante asfáltico para garantizar la perfecta impregnación.

- Para garantizar la adherencia entre el geotextil, la superficie de pavimento existente y para ayudar a la eliminación de arrugas, se debe compactar geosintético con un compactador neumático con baja presión entre 0,28 MPa y 0,35 MPa (2,80 kg/cm$^2$ a 3,60 kg/cm$^2$). También, se recomienda entre dos o tres pasadas a baja velocidad del compactador para inducir la penetración del ligante asfáltico en el geotextil.
- Cuando se está instalando el material en zona de curva, se debe de cortar en pequeñas secciones en forma rectangular como si se estuviera armando la curva por segmentos, cumpliendo con la distancia de traslapos del material.

Condiciones generales para la instalación de la capa de repavimentación según Koerner (2005), MACCAFERRI (2010) y PAVCO (2012)

- Se debe colocar la sobrecapa de pavimento flexible dentro de un plazo no mayor a 48 horas posterior a la colocación del geotextil, siempre y cuando no se haya aplicado la emulsión asfáltica sobre el material polimérico.
- Si se realizó una segunda aplicación de emulsión asfáltica sobre el geotextil, se debe de esperar a que esta rompa. Después de esto, se procede a aplicar la pintura de conexión, esparciendo manualmente mezcla asfáltica (la misma que se va a utilizar en la nueva capa) a lo largo de la faja de las huellas de la pavimentadora (Finisher) y de las ruedas de las vagonetas, con el fin de no dañar el material geosintético.
- Después de efectuar la aplicación de pintura de conexión, la colocación de la sobrecapa asfáltica se realiza de igual forma que en cualquier proceso de instalación y compactación de mezcla asfáltica, con la precaución de no realizar maniobras bruscas, que puedan rasgar el material geosintético.
- En pavimentos flexibles, al igual que en cualquier procedimiento de repavimentación, el espesor mínimo de la nueva capa debe ser de 5 cm hasta una pendiente máxima de 4% en sentido longitudinal y de 7 cm en pendientes longitudinales de 4% en adelante. Si no se utilizan estos espesores recomendados, la capa conformada por el geosintético puede empezar a absorber esfuerzos de tracción muy altos debido al movimiento de los vehículos, para los cuales esta capa no ha sido diseñada, y de este modo obtener resultados no deseados en la aplicación de esta técnica.

## 2.5. Metodología de diseño del refuerzo con geotextil no tejido

Metodología expuesta por Koerner (1999)

La metodología de diseño del refuerzo con geotextiles para prevenir las grietas de reflexión, se basada en la definición del factor de efectividad del tejido (FEF), el cual puede ser determinado cuantitativamente a partir de la siguiente ecuación (Koerner, 1999):

$$FEF = \frac{N_r}{N_n} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$FEF$: factor de efectividad del material (Cuadro 8)

$N_r$: número de ciclos de carga que causan la falla cuando se utiliza geotextil

$N_n$: número de ciclos de carga que causan la falla cuando no se utiliza el geotextil

Cuadro 8. Resultados de laboratorio valores FEF y el efecto del tipo de geotextil y su valor de módulo

| Tipo de geotextil | Masa / Unidad de área (g/m²) | Módulo secante[1] (N) | Ciclos de falla | Desviación estándar | FEF |
|---|---|---|---|---|---|
| Control, sin geotextil | - | - | 480 | 50 | 1,0 |
| No tejido, punzonado por ajugas, polipropileno | 150 | 590 | 1000 | 55 | 2,1 |
| No tejido, punzonado por ajugas, poliéster | 200 | 540 | 2300 | 880 | 4,8 |
| No tejido, punzonado por ajugas, polipropileno | 200 | 930 | 3260 | 610 | 6,8 |
| Tejido de fibras divididas, polipropileno/poliéster | 170 | 1600 | 2760 | 670 | 5,8 |
| Tejido, unido por calor, poliéster | 108 | 2000 | 7650 | 675 | 15,9 |

[1]Valores de la fuerza a un 5% de la deformación utilizando la prueba de tensión por agarre

Fuente: Koerner (1999)

El tráfico de diseño puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$DTN_r = \frac{DTN_n}{FEF} \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$DTN_r$: tráfico de diseño en el caso de un pavimento con refuerzo
$DTN_n$: tráfico de diseño en el caso de un pavimento sin refuerzo

Para implementar este método se utiliza el procedimiento de cálculo del Instituto de Asfalto (1992):

a) Determinar el valor de la resistencia de la subrasante del suelo (CBR).
b) Determinar el Número de Tráfico Inicial ($NTI_i$) como se describe en la metodología del Instituto del Asfalto (1992), la cual se basa en el conteo de vehículos, siendo una combinación del peso del vehículo y del número de repeticiones de carga.
c) Determinar el factor de ajuste para el período de diseño deseado y estimar la tasa de crecimiento anual del tráfico.
d) Multiplicar el NTIi por el factor de ajuste para obtener el número de tráfico de diseño ($DTN_n$) para usarse en las tablas del diseño de espesor del procedimiento AASHTO 93.
e) Determinar el espesor total requerido ($t_{an}$) necesario para resistir el DTN calculado y de acuerdo con la resistencia de diseño de la subrasante, a través de la Figura 8 (o equivalentes que se pueden encontrar en el procedimiento de diseño de sobrecapas del Instituto del Asfalto).
f) Determinar el espesor efectivo ($t_e$) del pavimento existente tal y como se discute en el procedimiento de diseño de sobrecapas del Instituto del Asfalto.
g) Calcular el espesor de la sobrecapa requerida a través de la diferencia $t_{an} - t_e$.
h) Repetir el procedimiento para cualquier caso en el que se use geotextil para reforzar el pavimento, utilizando la Ecuación 4 para determinar el $DTN_r$ que permite determinar el espesor $t_{ar}$.
i) Comparar los dos espesores resultantes (no reforzado, $t_{an}$, y reforzado con geotextil, $t_{ar}$) para señalar el ahorro en el espesor de la sobrecapa asfáltica Δt, ya que el espesor de la base es la misma en ambos casos.

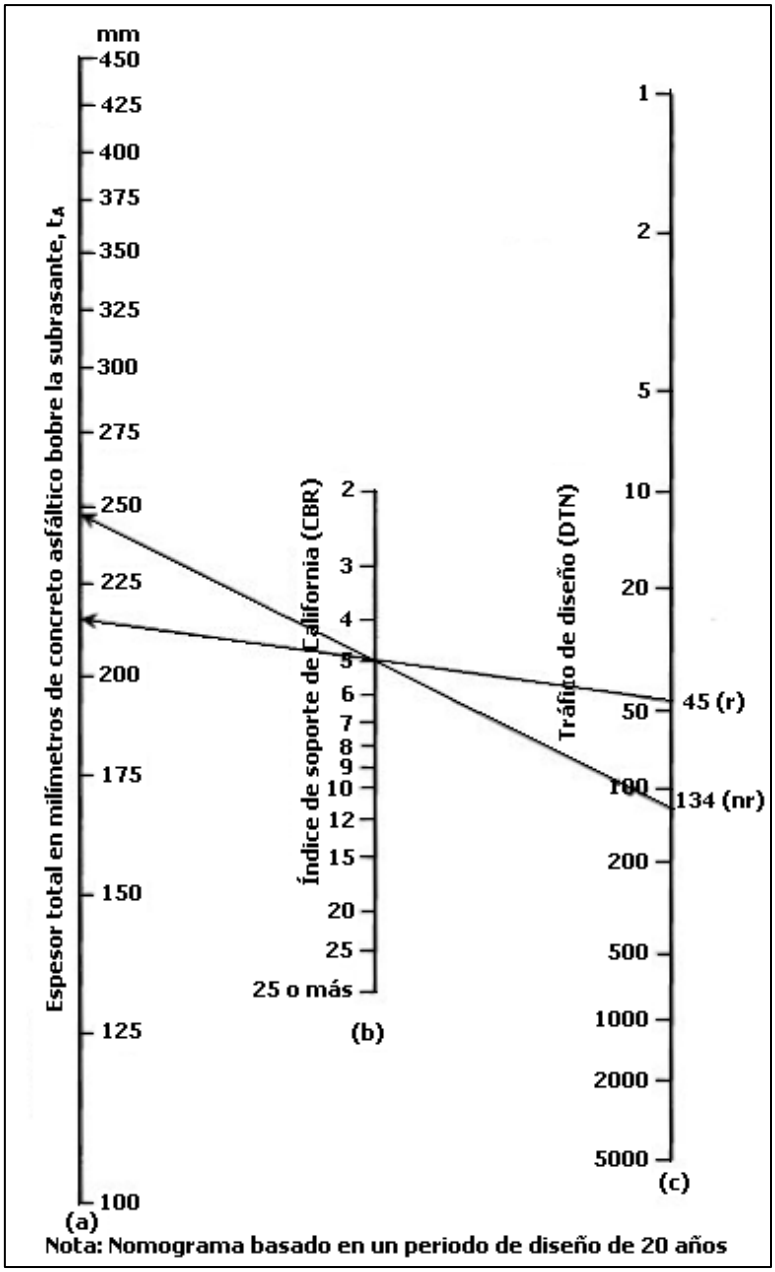



Figura 8. Espesor de diseño para estructuras de pavimento flexible usando el CBR y el DTN

Fuente: Instituto de asfalto, 1992

Modificado por: Gómez, 2019

## 2.6. Ensayos de caracterización de polímeros

### 2.6.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La Microscopía Electrónica de Barrido, conocida como SEM por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscopy,* es una técnica que permite obtener información sobre las características

morfológicas y topográficas sobre la superficie de un material, a través de imágenes de alta resolución que van desde los 20 Å hasta 50 Å (Salazar y García, 2016).

La caracterización morfológica por SEM presenta algunas ventajas en comparación con otras técnicas de caracterización como rayos X, ya que utiliza muestras más pequeñas (del orden de $10^{-16}$ g) y proporciona información de áreas menores (por debajo de 10 nm de diámetro). (Julián, 2013)

Para realizar el análisis es necesario acondicionar la muestra a ser evaluada, la cual debe ser conductora, por lo que se recubre con una capa delgada de metal o de carbono. Una vez preparada, se hace incidir un haz de electrones acelerados con energía desde 1000 hasta 40000 voltios. Los electrones salen del cañón y se enfocan mediante la lente condensadora, cuya función es reducir la imagen del filamento, de tal manera que incida sobre la muestra un haz de electrones lo más pequeño posible y de este modo obtener una mejor resolución. En la Figura 9 se muestra un esquema simplificado del modo de funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido.

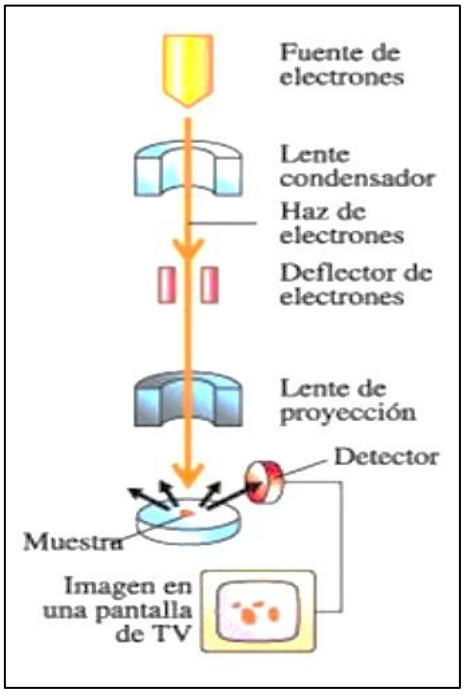



Figura 9. Esquema simplificado del modo de funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Fuente: Julián, 2013

Tal como se muestra en el esquema de la Figura 9 la señal emitida por los electrones y radiación resultantes del impacto se recoge mediante un detector y se amplifica para cada posición de la sonda. Conforme la sonda barre la superficie de la muestra varía la intensidad de la señal de un tubo de rayos catódicos que se desplaza en sincronía con la sonda. (Martí, 2013)

Tal como lo plantean Renau y Faura (1994) la versatilidad del Microscopio Electrónico de Barrido para el estudio de sólidos proviene de la amplia variedad de señales que se generan cuando el haz de electrones interacciona con el sólido, como se puede observar en el esquema de la Figura 10. Las interacciones del sólido se pueden dividir en dos categorías:

- Interacciones elásticas: afectan a las trayectorias de los electrones en el haz sin que se alteren significativamente sus energías.
- Interacciones inelásticas: resultan de transferir al sólido una parte o toda la energía de los electrones.

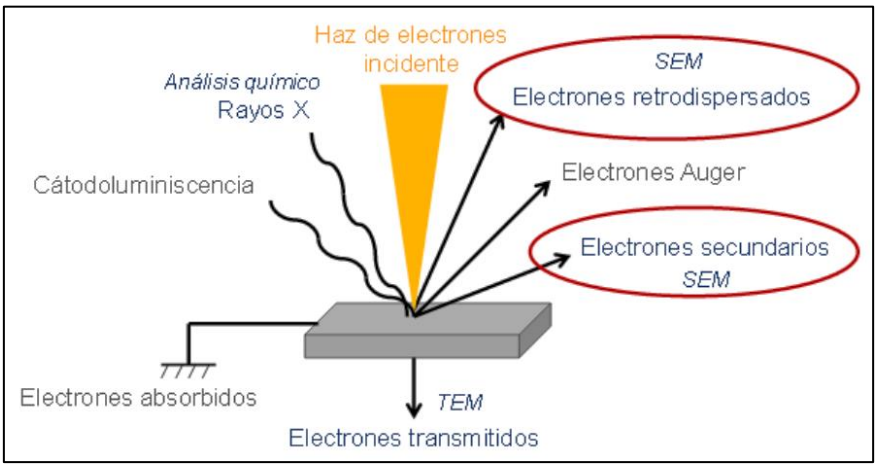



Figura 10. Resultado de la interacción del haz de electrones con la muestra

Fuente: Julián, 2013

Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra se producen varias formas de radiación en el microscopio, entre ellas dos fundamentales: los electrones secundarios y los electrones retrodispersados.

Los electrones secundarios son emitidos por la muestra en procesos ineslásticos de ionización debido a la colisión del haz incidente. Estos poseen baja energía (de 20 eV a 50 eV), por lo que vuelven a ser absorbidos por átomos adyacentes de forma que solo pueden escapar del espécimen los electrones secundarios generados cerca de la superficie (Ipohorski y Bozzano,

2013). Debido a esto las imágenes formadas por electrones secundarios representan las características de la superficie de la muestra. Se obtiene una imagen de apariencia tridimensional como la que se muestra en la Figura 11.

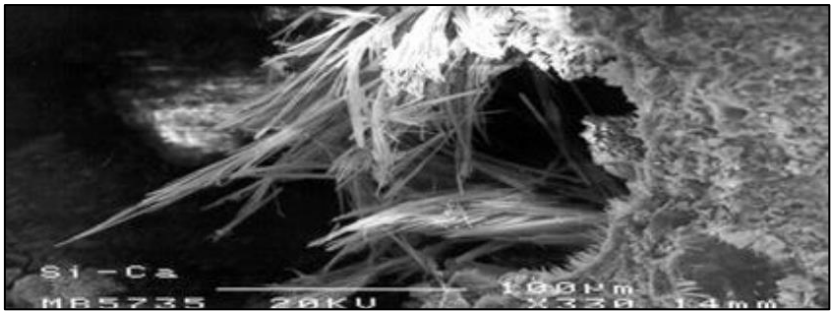



Figura 11. Apariencia de los resultados de SEM mediante electrones secundarios

Fuente: Martí, 2013

Los electrones retrodispersados son los que colisionan con los átomos de la muestra y son reflejados. Estos poseen mayor energía que los electrones secundarios, próxima a la del haz incidente (10-30) keV. La intensidad de emisión de estos depende del número atómico medio de los átomos de la muestra, donde los átomos más pesados producen más electrones retrodispersados y aparecen más brillantes en la imagen (Ipohorski y Bozzano, 2013). Estos electrones revelan diferencias de composición química por diferencias de contraste, tal como se muestra en la Figura 12.

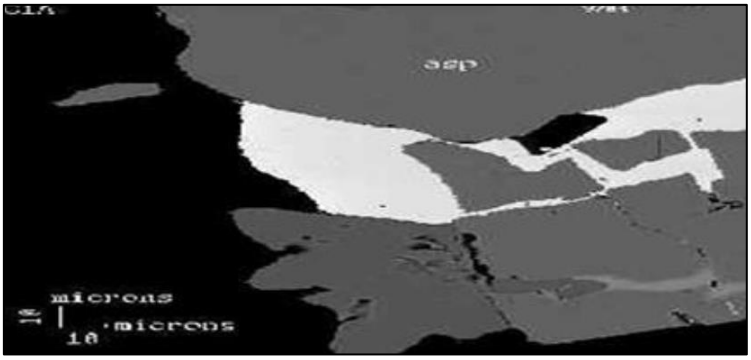



Figura 12. Apariencia de los resultados de SEM mediante electrones retrodispersados

Fuente: Martí, 2013

Existen casos en los que si la muestra es suficientemente delgada, una fracción de electrones incidentes consiguen atravesarla, sin variar su trayectoria ni energía, dando lugar al haz transmitido mostrado en la Figura 10.

### 2.6.2. Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

La espectrometría infrarroja es una técnica de análisis que permite obtener información química sobre las moléculas que se encuentran en la materia, a través de procesos de absorción y emisión. Esta se basa en la interacción entre la radiación y la muestra de estudio, en la cual se dan cambios de energía vibracionales y rotacionales.

La espectrocopía por infrarrojo utiliza elementos dispersivos, no dispersivos y de tipo de transformada de Fourier, siendo el último una técnica de alta resolución, que permite determinar las longitudes de onda de resonancia de las moléculas con mayor sensibilidad, precisión y exactitud, para un análisis cualitativo y cuantitativo de muestras complejas. (Orjuela y Ramos, 2008)

El espectro infrarrojo se extiende desde (10 a 14300) $cm^{-1}$, y este se divide en tres regiones espectrales:

- Infrarrojo lejano, donde se producen las absorciones debidas a vibraciones rotacionales. Comprende longitudes de onda entre $(5 \times 10^4 - 10^6)\ nm$ y números de onda de $(200 - 10)\ cm^{-1}$.
- Infrarrojo medio, donde se producen las vibraciones fundamentales. Comprende longitudes de onda entre $(2500 - 5 \times 10^4)\ nm$ y números de onda entre $(4000 - 200)\ cm^{-1}$.
- Infrarrojo cercano, donde se producen absorciones debidas a sobretonos y combinaciones de las bandas fundamentales. Comprende longitudes de onda $(700 - 2500)\ nm$ y números de onda $(14300 - 4000)\ cm^{-1}$.

El resultado de someter la muestra a radiación infrarroja, es que alguna de la energía es absorbida por la muestra mientras que otra es transmitida. La luz incidente tiene una intensidad mayor a la que la muestra transmite, por lo tanto, absorbe una parte de esta radiación incidente y la otra se ve reflejada. El espectro resultante representa la absorción y transmisión de la energía molecular y puede ser considerada como una huella digital de la misma. (Villegas, Loría, Aguiar, Corrales, Fernández y Reyes, 2012)

Para este caso se hace énfasis en la espectrometría de absorción en el infrarrojo, utilizando el espectrómetro de transformada de Fourier, el cual permite verificar la calidad de la muestra al

comparar el espectro resultante contra espectros de muestras con propiedades definidas y conocidas.

El espectrómetro de transformada de Fourier trabaja bajo el principio del interferómetro de Michelson-Morley, donde el haz de radiación proveniente de la fuente se divide en dos haces parciales mediante un espejo semipermeable (beamsplitter) que a su vez se reflejan en un espejo fijo y otro móvil, regresan al beamsplitter y se recombinan en interferencia, tal como se muestra en el esquema de la Figura 13. La intensidad de la señal llega al detector tras atravesar la muestra, representada como función de la diferencia de la trayectoria de ambos haces (retardo), lo que se conoce como interferograma. Con el tratamiento matemático de transformada de Fourier finalmente se logra obtener el espectro de la muestra. (Serrano, s.f.)

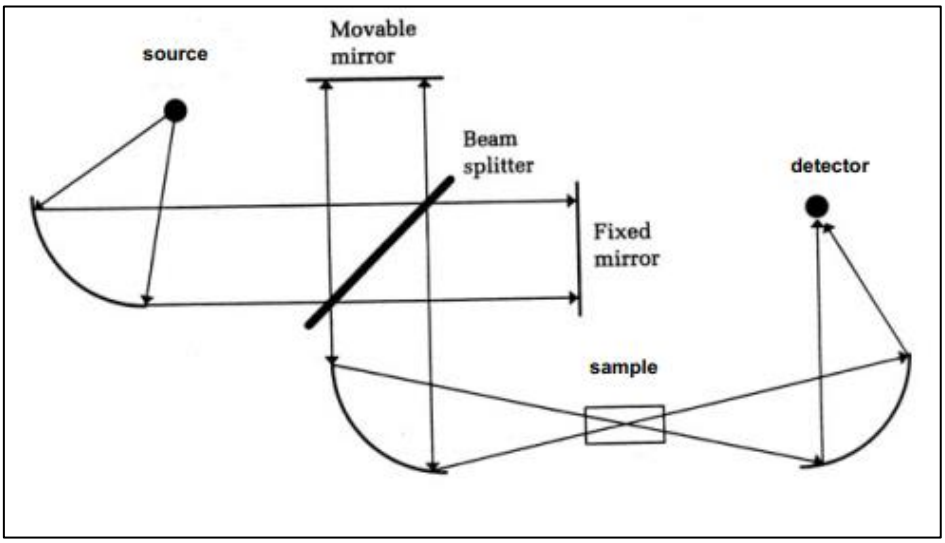



Figura 13. Esquema de un espectrómetro FT-IR con un interferómetro Michelson clásico

Fuente: Serrano, s.f.

El FTIR genera un espectro de la muestra donde indica el porcentaje de absorción en función del número de onda. El uso de estos espectros a diferentes temperaturas permite identificar el comportamiento de ciertos enlaces de la muestra, mediante la relación de la temperatura y número de onda y, así encontrar las temperaturas de transición. El equipo de espectrometría posee una interfase al computador, la cual permite el posterior análisis de los datos.

El comportamiento de los sólidos en el infrarrojo también se puede observar por técnicas de reflectancia y por el método fotoacústico, cuyos espectros son similares a los espectros de absorción y proporcionan la misma clase de información.

Reflectancia total atenuada (ATR)

El modo ATR (Attenuated Total Reflectance) es el que se va a utilizar en este proyecto, el cual es útil para obtener espectros IR de muestras, como polímeros, que no pueden ser colocadas en los soportes habituales para el método de transmisión. Al emplear el FTIR en el modo ATR la profundidad de detección es (1- 2) µm aproximadamente, permitiendo obtener espectros de mayor calidad.

El ATR ocurre cuando un haz de radiación entra desde un medio más denso (con un mayor índice de refracción) en un medio menos denso (con un menos índice de refracción). Cuando aumenta el ángulo de incidencia la fracción del haz reflejado se incrementa. Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico toda la radiación incidente se refleja en la interfaz. El haz penetra una distancia muy pequeña más allá de la interfaz hacia el medio menos denso antes de que suceda la reflexión completa, a esta penetración se le conoce como onda evanescente y se produce a una profundidad de pocas micras. La intensidad se ve atenuada por la muestra en las regiones del espectro IR donde la muestra absorbe. (Serrano, s.f.)

En la práctica, la muestra se coloca en contacto íntimo con un cristal denso y altamente refractivo de Seleniuro de Zinc (ZnSe) de 45 ° y 6 reflexiones internas. El haz IR se dirige hacia un extremo biselado del cristal y se refleja internamente a lo largo del cristal con una o más reflexiones. Con el incremento del ángulo de incidencia decrece el número de reflexiones y la profundidad de la penetración. El paso de luz puede modificarse cambiando el material del cristal o bien el plano de incidencia de este cristal. (Serrano, s.f.)

Al utiliza el ATR se requiere poca o ninguna preparación de la muestra, siendo una de las técnicas de muestreo más versátiles. El ATR horizontal posee una plataforma fácil de llenar con la muestra y fácil de limpiar. Además, está diseñado de forma que se pueda purgar la óptica fácilmente, siendo más rápido el tiempo de estabilización.

### 2.6.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)

La termogravimetría es parte de un conjunto de análisis térmicos que han sido desarrollados para identificar y medir los cambios físicos y químicos que ocurren en una sustancia al exponerse a variaciones controladas de temperatura. (Conesa, 2000)

El Análisis Termogravimétrico (TGA) es una técnica en la cual se monitorea la masa de una sustancia como función de la temperatura o el tiempo al cual la muestra se encuentra sometida dentro de un programa de temperatura controlada en una atmosfera controlada. En el primer caso, experimento dinámico, la temperatura de la muestra va aumentando de manera controlada (normalmente de forma lineal con el tiempo), y en el segundo caso, experimento isotermo, la temperatura se mantiene constante durante todo el experimento. (Granados, 2015)

Los cambios de masa identificados permiten determinar la condición a la que el material se descompone. La representación gráfica de la masa o del porcentaje de masa en función de la temperatura o del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica.

Es importante aclarar que este método no permite conocer la composición química del material en estudio ni identificar los cambios térmicos que no están asociados con variaciones de masa, tal como la cristalización o la transición vítrea (Rodríguez y Villegas, 2012). Dentro de los procesos que permite detectar está la descomposición, sublimación, reducción, desorción, absorción; mientras que no permite estudiar procesos como fusiones ni transiciones de fase.

Entre las aplicaciones más importantes de los métodos termogravimétricos se encuentra el estudio de los polímeros, donde cada uno presenta un modelo de descomposición característico, y en algunos casos se puede utilizar con finalidades de identificación. De acuerdo con Meira y Gugliotta (2016) en el área de la química de polímeros, la termogravimetría se aplica al estudio de:

- Degradación térmica.
- Estabilidad térmica.
- Degradación oxidativa.
- Reacciones de estado sólido.
- Determinación de humedad, volátiles y cenizas.
- Procesos de absorción, adsorción y desorción.
- Composición de plásticos y materiales compuestos.
- Identificación de polímeros (por análisis de sus termogramas).

Tal como lo indica Granados (2015) el equipo de TGA es principalmente una termo balanza que consta de las siguientes cinco partes principales:

1) Una microbalanza electrónica y su equipo de control
2) Un horno y los sensores de temperatura
3) Un programador de temperatura
4) Un controlador de la atmósfera (tipo de gas y caudal)
5) Dispositivo para almacenar los datos de peso y temperatura

Además, el horno debe cumplir con las siguientes características:

1) Debe tener una zona de temperatura uniforme que debe ser mayor que la muestra y el soporte en el que se coloca
2) El calor del horno no debe afectar el mecanismo de la balanza
3) Debe ser capaz de una respuesta y de calentar y enfriar con un amplio rango de velocidades
4) Enfriamiento rápido
5) Las paredes del horno deben ser inertes al gas utilizado y al producto desprendido en todas las temperaturas usadas
6) Debe poseer un aislamiento térmico externo eficiente

En la Figura 14 se muestra un esquema típico de TGA.

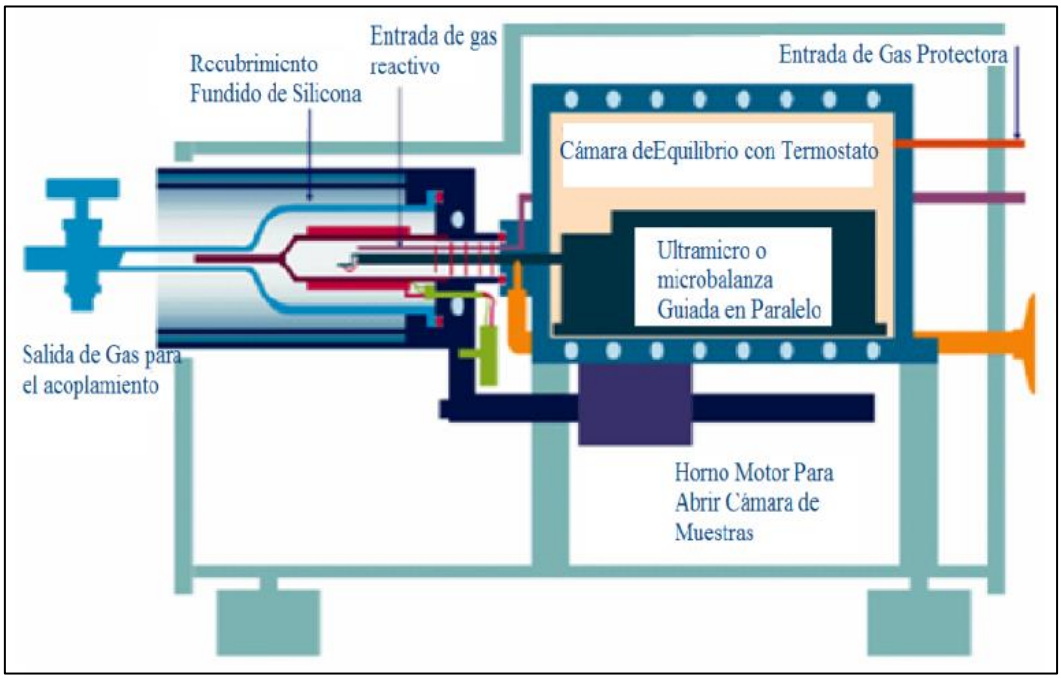



Figura 14. Esquema típico de TGA

Fuente: Puello, Afanasjevab & Alvarez, 2013

En la Figura 15 se presentan termogramas con perfiles típicos de masa en función de la temperatura.

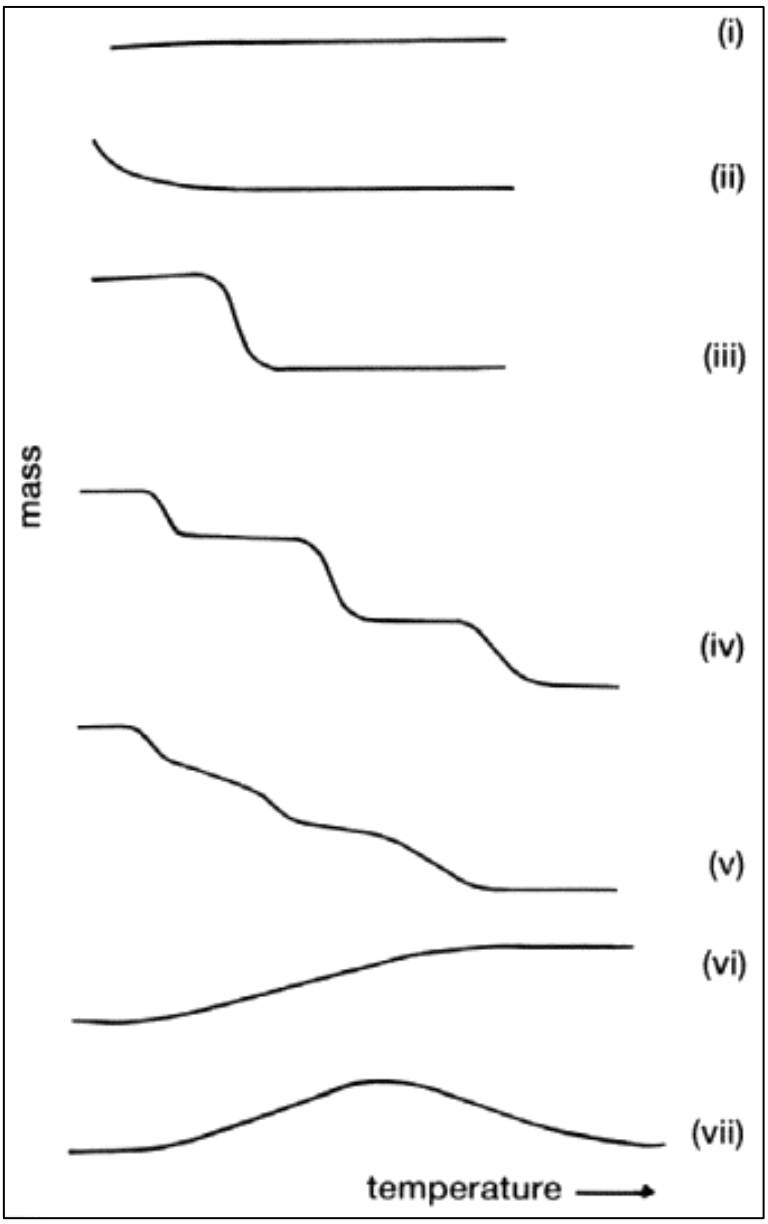



Figura 15. Curvas de TGA típicas

Fuente: Granados, 2015

A continuación, se interpreta cada uno de los termogramas de la Figura 15:

(i) La muestra no sufre descomposición con pérdida de productos volátiles en el rango de temperaturas mostrado. Puede ocurrir reacciones tipo: transición de fase, fundido, polimerización.

(ii) Se da una rápida pérdida de masa inicial, la cual es característica de los procesos de desorción y secado.

(iii) Representa la descomposición de la muestra con formación de productos de reacción de volátiles en un proceso simple. La curva puede ser utilizada para definir los límites de estabilidad del reactante, determinar la estequiometría e investigar la cinética de las reacciones.

(iv) Indica una descomposición multietapa con productos intermedios relativamente estables. En esta se puede definir los límites de estabilidad del reactante e intermedios, y de forma más compleja la estequiometría de la reacción.

(v) Muestra una descomposición multietapa, pero los productos intermedios no son estables (es más difícil obtener información cinética).

(vi) Ocurre una ganancia de masa (fenómeno conocido como adsorción) como consecuencia de la reacción de la muestra con la atmósfera que la rodea

(vii) El producto de una reacción de oxidación se descompone a temperaturas más elevadas.

A través de proyecciones horizontales sobre el eje de masa del termograma se puede cuantificar el porcentaje de pérdida o ganancia de masa para un cierto cambio, sin embargo, en muchos casos (transformaciones simultáneas o sobrepuestas) la apariencia del termograma no permite una determinación gráfica directa. Además, no siempre es sencillo, establecer los puntos de inflexión de las curvas por lo que no es simple localizar la temperatura de la transición, por lo que se recurre a la representación de la derivada de la masa en función de la temperatura. La superposición de estas curvas permite establecer temperaturas de transición, determinar los puntos de velocidad máxima de pérdida de masa y con ello, realizar estudios cinéticos de las transformaciones térmicas (Zambrano, 2014). Un ejemplo de estas curvas se muestra en la Figura 16.

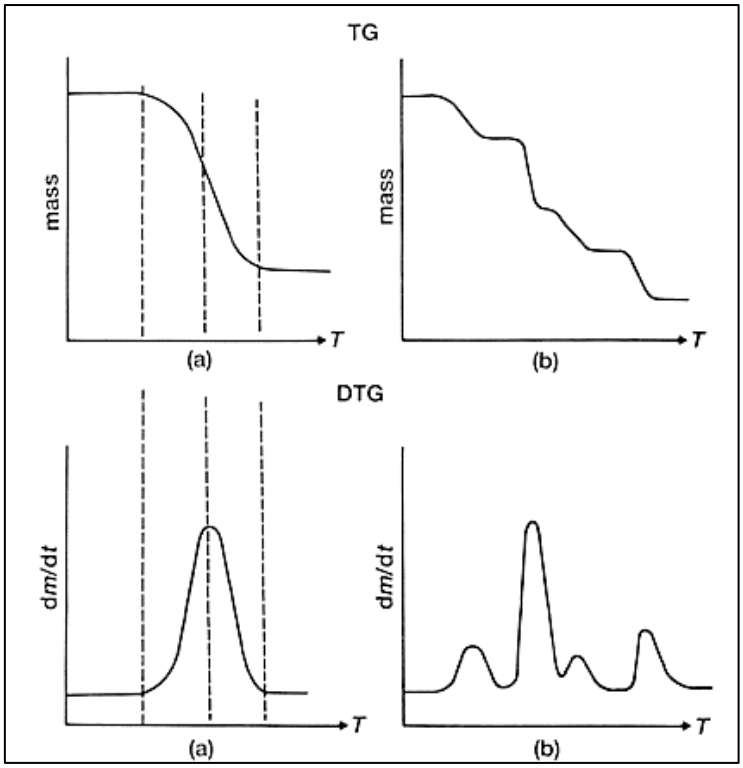



Figura 16. Comparación de curvas TG y DTG

Fuente: Granados, 2015

### 2.6.4. Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)

La Calorimetría Diferencial de Barrido es un método de análisis térmico en el cual se mide la diferencia entre la cantidad de calor transferido a una sustancia de prueba y la cantidad de calor aportado a una sustancia de referencia en función de la temperatura, es decir, se mide energía térmica y permite la determinación precisa de la capacidad calorífica de un material (Zambrano, 2014). Esta se puede realizar mediante dos metodologías:

Dinámica: la muestra se somete a procesos de calentamiento (o enfriamiento) constante controlado, con lo que se obtiene la variación de flujo de calor como función de la temperatura.

Isotérmica: la muestra se calienta inicialmente hasta cierta temperatura, la cual se mantiene constante durante el transcurso del ensayo, de este modo de obtiene la variación del flujo de calor como función del tiempo.

Existen dos métodos para obtener la diferencia de calor transferido:

Calorimetría diferencial de barrido de potencia compensada

La muestra y la referencia se exponen a fuentes de calor separadas, tal como se muestra en la Figura 17, donde S representa la muestra y R la referencia la cual es una cápsula o crisol desocupado del mismo material y masa que el platillo que contiene la sustancia de interés. El método consiste en determinar la diferencia entre la cantidad de calor que fluye hacia la muestra y la cantidad de calor que fluye hacia la referencia, en la medida en que la temperatura se modifica linealmente. La cápsula que contiene la muestra requiere más calor para lograr que la temperatura aumente a la misma velocidad que la temperatura de la referencia. Para mantener las temperaturas iguales, el horno de muestra suministra más calor a la sustancia de prueba que el horno de referencia al crisol referencia, y este comportamiento se extiende si en la sustancia de prueba ocurren transiciones (endotérmicas o exotérmicas) tales como síntesis, descomposición, cristalización y transformaciones de fase.

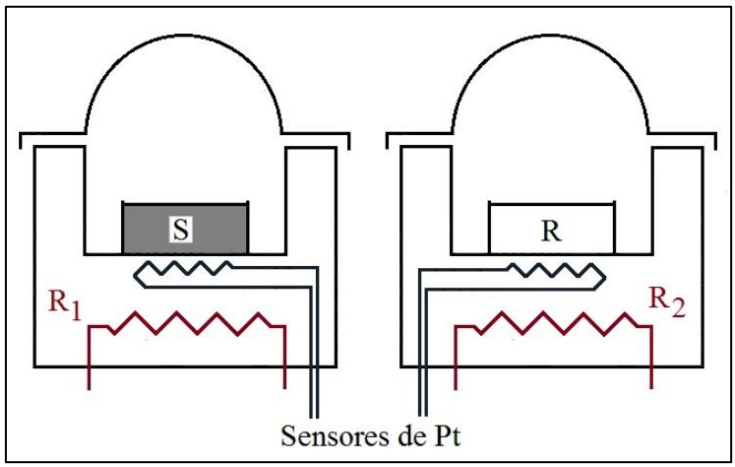



Figura 17. Esquema del método de calorimetría diferencial de barrido de potencia compensada

Fuente: Hemminger & Sarge, 1998

Modificado por: Zambrano, 2014

Calorimetría diferencial de barrido de flujo de calor

El calor fluye hacia la muestra (S) y la referencia (R) a través de un disco termoeléctrico, tal como se muestra en la Figura 18. La temperatura se modifica a través de un control programador mediante un gradiente lineal. Con la ayuda de los termopares se lee la temperatura de la cápsula con la muestra y la cápsula de referencia. Bajo el supuesto de que la conductividad térmica del sistema (disco de calentamiento, soportes y cápsulas) se mantiene constante, se admite que la diferencia de calor transferido es directamente proporcional al

potencial eléctrico de salida de los termopares de superficie que se ubican por debajo de los platillos. Finalmente, se obtiene un termograma con la diferencia de calor (registrada con la termocupla situada debajo del platillo de muestra) en función de la temperatura. (Zambrano, 2014)

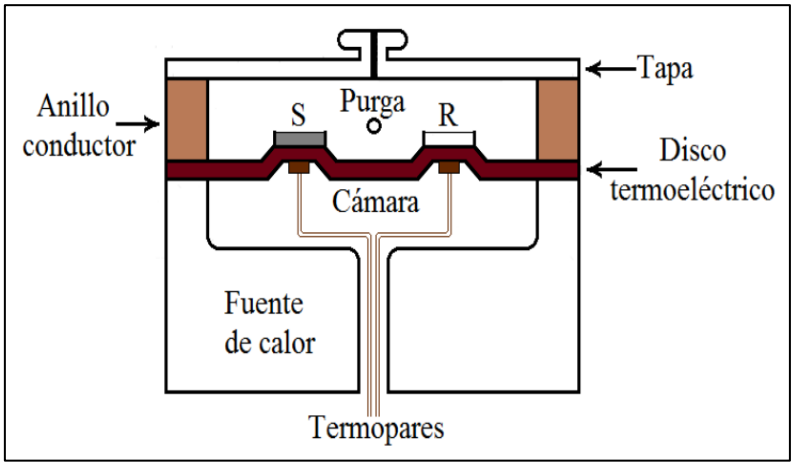



Figura 18. Esquema del método de calorimetría diferencial de barrido de flujo de calor

Fuente: Skoog, Holler & Nieman, 2001

Modificado por: Zambrano, 2014

El DSC permite trabajar en un intervalo de temperaturas desde la temperatura del nitrógeno líquido hasta unos 600 °C aproximadamente. La familia de los polímeros presenta todas sus transiciones térmicas en ese intervalo, razón por la cual esta técnica de análisis se emplea para la caracterización de estos materiales.

El análisis térmico permite evaluar las propiedades de las sustancias con lo cual se hace identificación, se verifica la estabilidad física y química, se detectan cambios de fase y se realizan estudios cinéticos fundamentales. Específicamente, en el campo de los polímeros se puede determinar transiciones vítreas, puntos de cristalización, temperaturas de fusión y degradación, además, permite hacer estudios de compatibilidad de polímeros, reacciones de polimerización y procesos de curado. En la Figura 19 se muestra el termograma típico para un polímero semicristalizado que ha sido enfriado rápidamente hasta una temperatura inferior a su temperatura de transición vítrea y luego calentado a cierta velocidad.

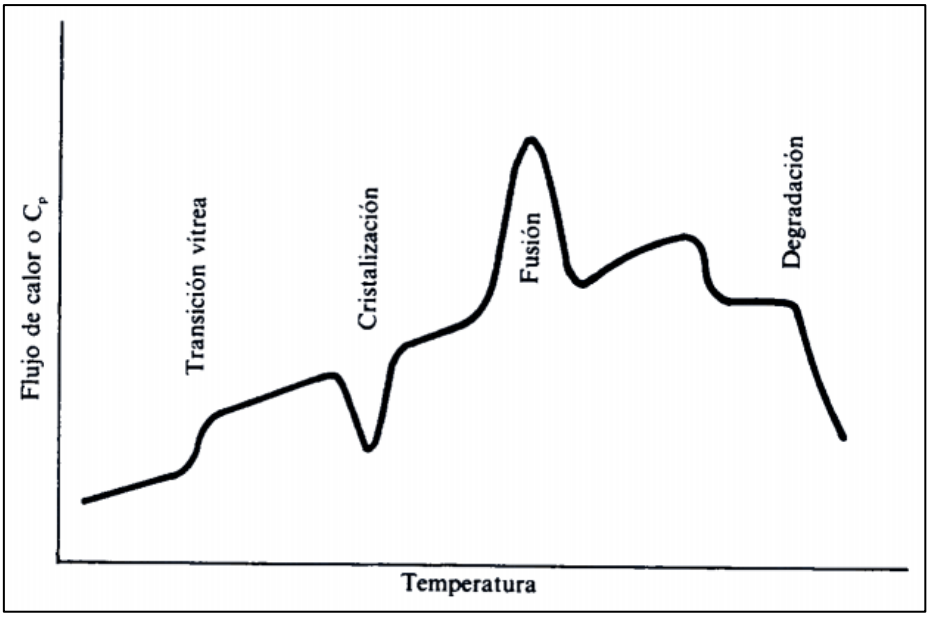



Figura 19. Termograma típico de un polímero semicristalino

Fuente: Llorente y Horta, 1991

Las transiciones térmicas que se dan durante este ensayo son los cambios que tienen lugar en un material cuando es calentado o enfriado, pueden ser transiciones físicas de primer o segundo orden o transiciones químicas, las cuales se describen a continuación de acuerdo con Zambrano (2015).

Transiciones térmicas físicas de primer orden

Estas corresponden a las transiciones térmicas de fusión y cristalización, y ocurren de forma isotérmica a una velocidad de calentamiento constante. La curva obtenida en el DSC es generada debido a una diferencia de temperatura entre la muestra y el sensor de la misma, lo que produce una variación del flujo de calor.

Fusión: es el cambio de fase de sólido a líquido. Cuando una sustancia se encuentra a su temperatura de fusión, el calor que se suministra (calor de fusión) es absorbido por la muestra durante su transformación, es decir, se produce una transición endotérmica y no se produce una variación de temperatura. (Skoog et al., 2001)

Cristalización ($T_c$): el punto de cristalización es la temperatura a la cual se alcanza suficiente energía para que se dé un arreglo cristalino del material. Este cambio físico implica una liberación de calor, es decir, se produce una transición exotérmica. (Skoog et al., 2001)

Transiciones térmicas físicas de segundo orden

Ocurre cuando se da un cambio en la capacidad calorífica, no existe calor latente liberado o absorbido. Un ejemplo de esta es la transición vítrea la cual se describe a continuación.

Transición vítrea ($T_g$): es exclusiva de las regiones amorfas que pasan de estado vítreo a estado blando (proceso que ocurre a bajas temperaturas). Se da en los polímeros, donde el polímero amorfo pasa de comportarse como un material rígido a un material fácilmente deformable. A nivel molecular, la transición vítrea define la temperatura (o intervalo de temperaturas) a partir de la cual los enlaces que constituyen la cadena empiezan a tener gran libertad de rotación interna. (Llorente y Horta, 1991)

Transiciones térmicas químicas

Estas representan el calor de reacción involucrado en un cambio químico, el cual puede ser endotérmico o exotérmico, tal como se muestra en la Figura 20, donde los picos endotérmicos, (en los que se requiere energía) apuntan hacia arriba, ya que el instrumento debe suministrar más energía a la muestra para mantenerla a la misma temperatura que la referencia, y en eventos exotérmicos (en los que se libera energía) aplica la lógica inversa. El proceso es endotérmico si el cambio de entalpía es positivo y es exotérmico si se da un cambio de entalpía negativo.

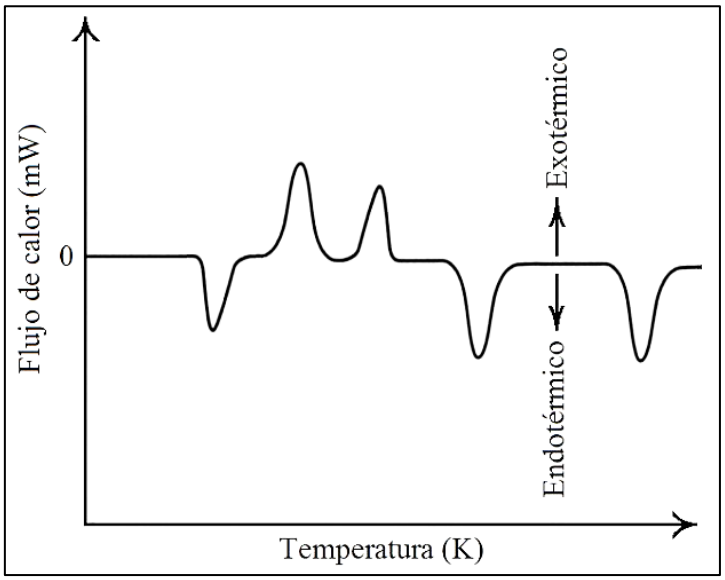



Figura 20. Termograma hipotético de DSC

Fuente: Zambrano, 2014

En la Figura 21 se muestra las posibles curvas de DSC que se pueden obtener y su interpretación.

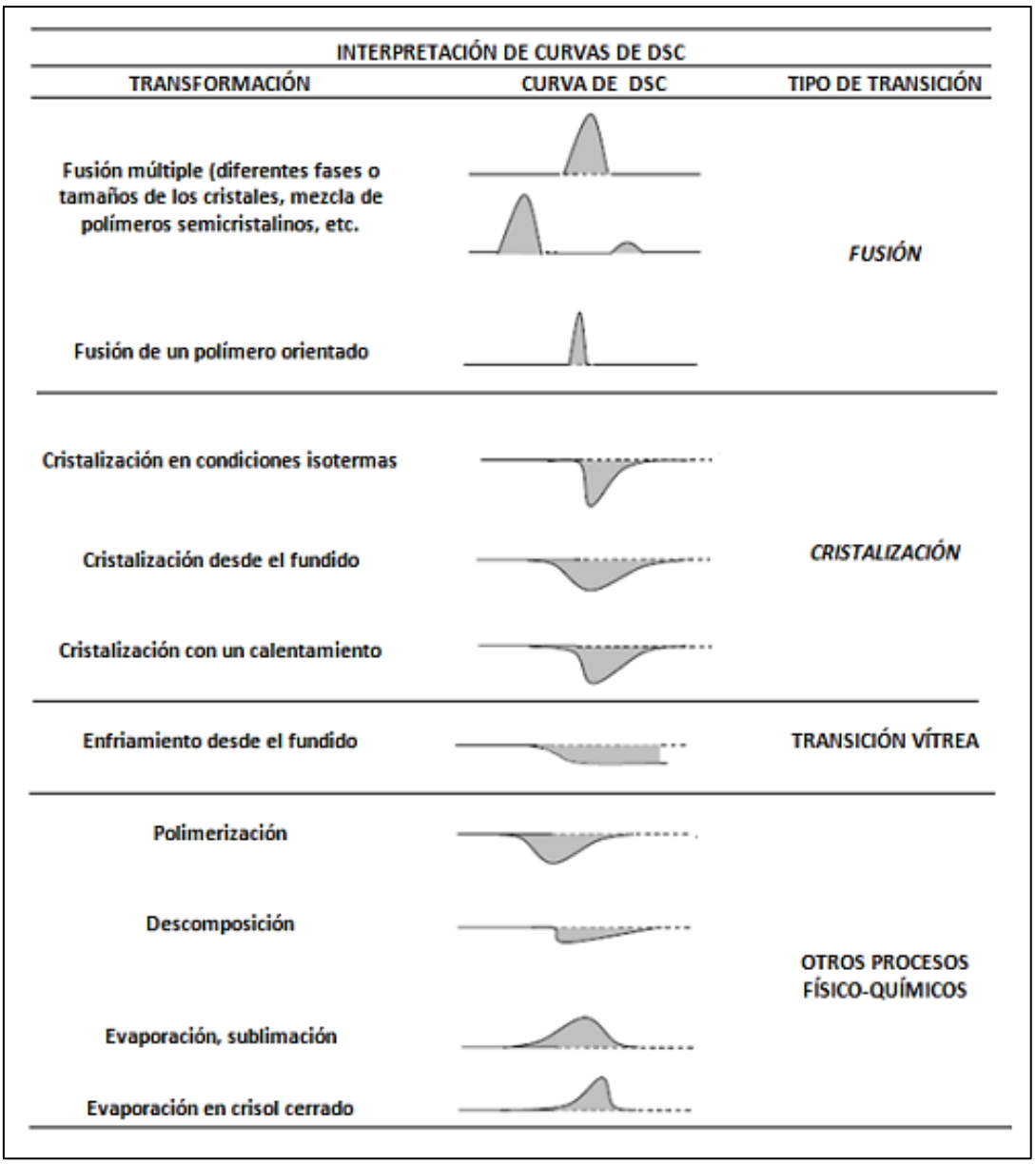



Figura 21. Interpretación de curvas DSC
Fuente: Granados, 2015

### 2.6.5. Goniometría

La goniometría es la técnica que se utiliza para la medición de ángulos de contacto, lo cual es útil para caracterizar la interacción entre un líquido o un material viscoso y una superficie sólida. El ángulo de contacto es función de la tensión superficial del líquido y de la energía libre

superficial (ESL) del sustrato, y este puede evaluarse a través del método de la gota sésil, el cual consiste en colocar una pequeña gota de líquido en una superficie sólida y observar cómo se comporta el líquido al mojar el sólido (Solano, Lima, Velazquez, Rodríguez y Tejero, 2009).

Al colocar una gota del líquido sobre el sólido, el ángulo formado entre la interfaz sólido-líquido y la interfaz líquido-vapor (cuyo vértice está donde las tres interfaces se encuentran) corresponde al ángulo de contacto, tal como se ejemplifica en la Figura 22.

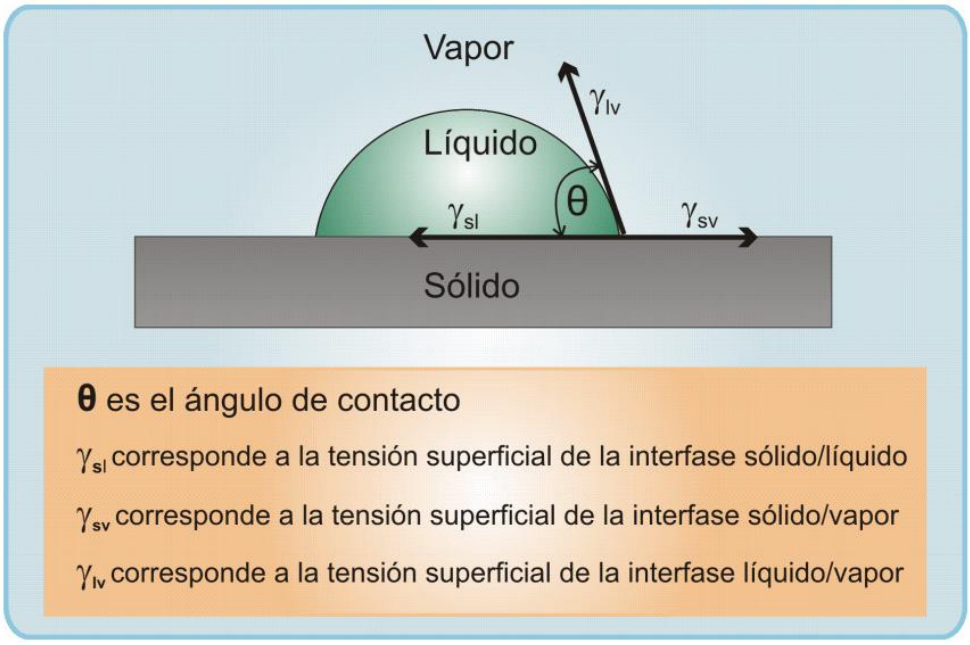



Figura 22. Esquema del ángulo de contacto
Fuente: Diaz, 2011

En los últimos años se ha venido utilizando el ensayo de goniometría para ligantes asfálticos, el cual se lleva a cabo mediante un goniómetro que mide el ángulo de contacto con una cámara de alta definición, evidenciando la afinidad química entre una gota de ligante asfáltico y el sustrato o roca a una determinada temperatura. La forma de la gota se relaciona directamente con la mojabilidad del líquido en la superficie del material, es decir, si las moléculas del fluido tienen una atracción más fuerte a las moléculas de la superficie sólida que entre sí (las fuerzas adhesivas son más fuertes que las fuerzas de cohesión) la humectación de la superficie sólida se produce. Por el contrario, si las fuerzas de cohesión son más fuertes que las de adhesión se forma una gota y no moja la superficie del sólido. Dicho comportamiento se resume en el Cuadro 9 y se esquematiza en la Figura 23.

Cuadro 9. Humectación de acuerdo al ángulo de contacto

| **Ángulo de contacto ($\theta$)** | **Grado de mojado** |
|---|---|
| $\theta = 0$ | Perfectamente mojado |
| $0 < \theta < 90°$ | Alta humectabilidad y adhesividad |
| $90° \leq \theta < 180°$ | Baja humectabilidad y adhesividad |
| $\theta = 180°$ | No humectante |

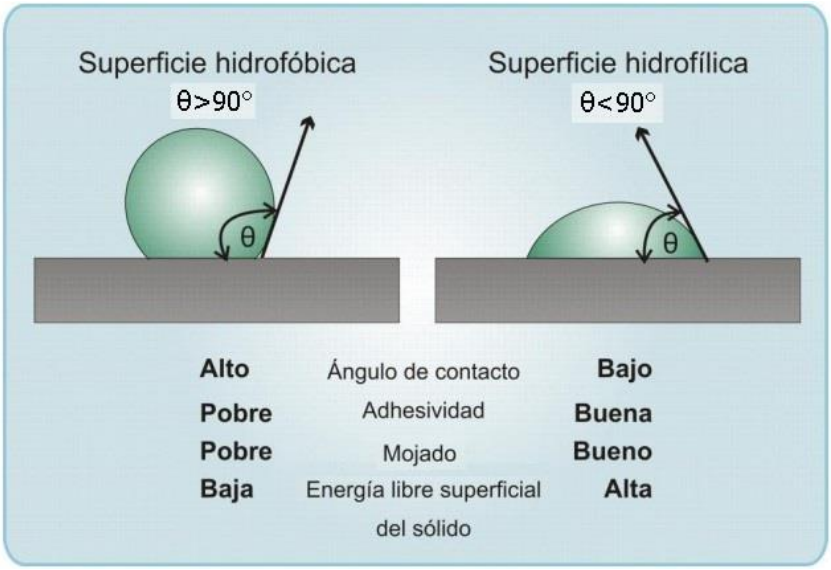



Figura 23. Ángulo de contacto en una superficie hidrofóbica e hidrofílica
Fuente: Diaz, 2011
Modificado por: Gómez, 2019

La Ecuación 5 corresponde a la ecuación de Young la cual describe las interacciones entre las fuerzas de adhesión y cohesión, con la cual es posible determinar la energía superficial por unidad de área.

$$\gamma^{sv} = \gamma^{sl} + \gamma^{lv} \cos\theta \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$\gamma^{sv}$: tensión superficial de la interfase sólido-vapor
$\gamma^{sl}$: tensión superficial de la interfase sólido-líquido
$\gamma^{lv}$: tensión superficial de la interfase líquido-vapor

Tal como lo indica la norma ASTM D7334 (2013) una superficie que es fácil de humedecer es una sobre la cual es más probable que un revestimiento proporcione una buena adherencia y

menos probabilidades de sufrir defectos relacionados con la tensión superficial tal como el arrastre. Además, indica que un valor de ángulo de contacto menor a 45° es indicativo de buena humectación, ángulos de 10° a 20º indican una excelente humectación y ángulos entre 45° y 90° representan una superficie intermedia, es decir, entre hidrofílica e hidrofóbica.

### 2.6.6. Resistencia a la tensión GRAB

El ensayo GRAB permite determinar la resistencia a la tensión y la elongación en una fracción del ancho del espécimen de geotextil ensayado. Está normado bajo la ASTM D4632 "Método estándar para la determinación de la carga de rotura y elongación de geotextiles". A través de este ensayo se evalúa la calidad del geosintético ya que se obtiene la curva de desplazamiento contra fuerza a la tracción GRAB, lo que permite determinar variables como la deformación longitudinal, esfuerzo a tracción, módulo del material y resistencia a la tracción GRAB.

El ensayo consiste en aplicar, a un espécimen de prueba, una carga longitudinal que se va incrementando hasta que el material llegue a la falla. Para esto se utilizan muestras rectangulares de 101,6 mm x 203,2 mm (4 in x 8 in) y se someten a tensión en la dirección paralela a su longitud mayor. En la Figura 24 se muestra un esquema del método GRAB.

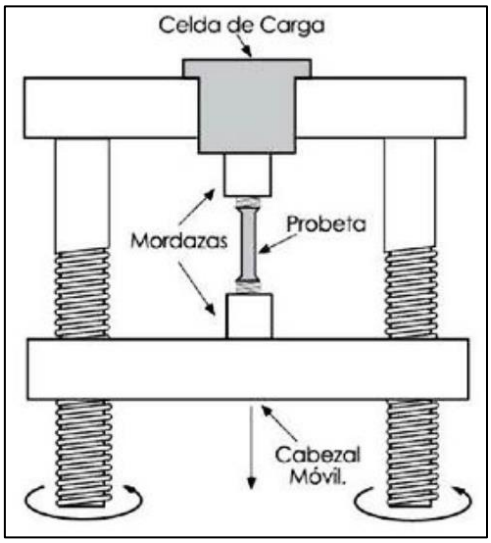



Figura 24. Esquema de ensayo ASTM D4632
Fuente: PAVCO, 2012

De acuerdo con la norma ASTM D4632 el método GRAB es aplicable cuando se requiere determinar la resistencia efectiva de un geotextil, es decir, la resistencia del material en un ancho específico junto con la resistencia adicional aportada por el material adyacente.

# Capítulo III. Etapa experimental y resultados

## 3.1. Esquema experimental

La etapa experimental de este proyecto consiste en detallar la morfología del geotextil no tejido de polipropileno, así como su arreglo estructural a través de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), verificar la calidad del geotextil y su identidad química con la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR), determinar su efecto térmico ante un barrido de temperaturas a partir del Análisis Termogravimétrico (TGA) y la Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), así como la adhesión entre el sistema geotextil-ligante asfáltico por medio del ensayo de Goniometría. También, se realiza un ensayo de Resistencia a la tensión GRAB, con el fin de determinar si las características mecánicas del material varían con la exposición a la temperatura y evaluar el desempeño del geotextil.

Debido a que con este proyecto se quiere evaluar la influencia de la temperatura en las propiedades químicas y mecánicas del geotextil, se escogen las temperaturas de 60°C y 80°C para simular el efecto de la emulsión asfáltica con la que se impregna el geotextil en el campo, así como las temperaturas de 150 °C y 170 °C para determinar el efecto térmico durante la colocación de la mezcla asfáltica, siendo la última temperatura un límite crítico máximo. Para el caso del TGA y DSC se realiza un barrido de temperaturas.

### 3.1.1. Materiales utilizados en el proyecto

Geotextil

Para realizar los ensayos propuestos en la sección anterior se eligió un geotextil no tejido de polipropileno que correspondiera con los requerimientos mínimos tanto para repavimentación de carreteras de bajo tránsito como de alto tránsito. Dichos parámetros se muestran en el Cuadro 3 y en el Cuadro 4, respectivamente.

Según Button & Lytton (2015) en su "Guía de uso de geosintéticos en sobrecapas de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC) para reducir el reflejo de grietas", el espesor de fabricación del geotextil influye en la resistencia que este aporta. El uso de tejido más grueso resulta en un menor esfuerzo en la punta de la grieta, en comparación con uno menos grueso, lo que retarda el reflejo de la grieta por más tiempo. Para que esta teoría sea válida, el geotextil no tejido debe estar debidamente dosificado con emulsión asfáltica. Además, estos autores indican que

el geotextil utilizado como capa intermedia para aliviar esfuerzos debe tener una masa por unidad de área mínima de 4,1 oz/yd$^2$ (139 g/m$^2$) y por practicidad un máximo de 6 oz/yd$^2$ (203 g/m$^2$) para permitir una adecuada saturación de emulsión asfáltica en el campo.

De acuerdo con los geotextiles existentes en el mercado en Costa Rica, los requerimientos mínimos mostrados en el Cuadro 3 y el Cuadro 4 y la guía de Button & Lytton (2003), se eligieron dos tipos de gramaje de geotextil no tejido de polipropileno para ser ensayados, los cuales corresponden a MacTex® N 27.1 (de 140 g/m$^2$) y el MacTex® N 40.1 (de 203 g/m$^2$), ambos provenientes de la empresa MACCAFERRI.

Emulsión asfáltica

Para impregnar los dos tipos de geotextil elegidos se va a utilizar emulsión catiónica de rotura rápida CRS-1, producida por RECOPE. Esta posee un porcentaje de asfalto residual de 66,9 % por medio de destilación y una densidad de 1007 kg/m$^3$.

### 3.1.2. Metodología de aplicación de la emulsión asfáltica

A través de una revisión del proyecto de graduación "Estimación de la dosificación apropiada de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos flexibles con uso de geosintéticos" de Solano (2016), se decide utilizar la metodología de aplicación de ligante asfáltico por peso.

De acuerdo con el Cuadro 6 la tasa de emulsión asfáltica recomendada para un geotextil no tejido de polipropileno con un gramaje de 140 g/m$^2$ es de (0,80-1,00) l/m$^2$ y para uno de 205 g/m$^2$ es de (1,20-1,40) l/m$^2$. A partir de estos valores y los resultados obtenidos por Solano (2016), quien ensayó las mismas muestras, se decide dosificar el geotextil MacTex® N 27.1 con 1,0 l/m² y el geotextil MacTex® N 40.1 con 1,2 l/m² para obtener el desempeño óptimo del sistema.

Según la metodología constructiva para la rehabilitación con sobrecapas asfálticas utilizando geosintéticos y las recomendaciones de MACCAFERRI (2010) se va a aplicar de un 80 % de emulsión asfáltica bajo el geotextil y el restante 20 % encima de la muestra, lo cual simula un 80 % de aplicación de riego de liga a la tasa definida experimentalmente sobre la capa existente, y el restante 20 % luego de instalar el geotextil. En el Cuadro 10 se muestra la dotación de emulsión asfáltica para cada tipo de geotextil a ensayar.

Cuadro 10. Dotación de emulsión asfáltica para aplicar a cada muestra de geotextil

| Tipo de geotextil | Dosificación residual (l/m²) | Primera aplicación 80 % (l/m²) | Segunda aplicación 20 % (l/m²) |
|---|---|---|---|
| MacTex® N 27.1 | 1,00 | 0,80 | 0,20 |
| MacTex® N 40.1 | 1,20 | 0,96 | 0,24 |

La metodología de aplicación mencionada se describe a continuación:

Aplicación de riego de liga por peso

Esta metodología consiste en verter el peso exacto de la dotación de la emulsión asfáltica sobre la muestra de geotextil de forma manual. Para esto se utiliza una balanza, la cual se tara con la muestra y se vierte el peso calculado de la emulsión, tal como se muestra en la Figura 28.

a) Antes de la aplicación b) Después de la aplicación

Figura 25. Metodología de aplicación de riego de liga por peso

Es necesario conocer la densidad y el porcentaje de asfalto residual de la emulsión asfáltica para determinar el peso de la dotación que se va a aplicar sobre la muestra.

A continuación, se realiza el cálculo del peso exacto que debe rociarse sobre la muestra de geotextil MacTex® N 40.1, con una dosificación recomendada de 1,20 l/m² y los porcentajes de aplicación de 80 % y 20 %, respectivamente, como se presentó en el Cuadro 10.

Ejemplo de cálculo de peso:

Para una dosificación inicial 0,96 l/m$^2$, en un área neta de 0,020645 m$^2$ (la cual corresponde a especímenes rectangulares de 203,2 mm $\times$ 101,6 mm) se determina la cantidad de litros de emulsión asfáltica que se requieren aplicar:

$$0{,}96\ \frac{l}{m^2} * 0{,}020645\ m^2 = 0{,}0198\ l \qquad \text{Ecuación 6}$$

Después la dotación a emplear en gramos por medio de la densidad de la emulsión:

$$0{,}0198\ l * \frac{10^{-3}\ m^3}{l} * 1007 \frac{kg}{m^3} * \frac{10^3 g}{1\ kg} = 19{,}9581\ g \qquad \text{Ecuación 7}$$

Las dotaciones recomendadas son tasas de asfalto residual que no contemplan el agua que contiene la emulsión, debido a que esta se evapora cuando la sustancia rompa, por lo que se utiliza el porcentaje de asfalto residual para obtener el peso de la emulsión asfáltica que se debe de aplicar tomando en cuenta la cantidad de agua que esta contiene.

$$19{,}9581\ g * \frac{1}{0{,}669} = 29{,}83\ g \qquad \text{Ecuación 8}$$

Por lo tanto, para impregnar el geotextil MacTex® N 40.1 a una tasa de 0,96 l/m$^2$ de emulsión asfáltica, se debe aplicar 29,83 g de emulsión asfáltica en un área neta de 0,020645 m$^2$.

Para el restante 20 % de emulsión, es decir, 0,24 l/m$^2$ se sigue el mismo procedimiento de cálculo, donde se obtiene un peso de 7,46 g en un 0,020645 m$^2$.

En el Cuadro 11 se muestra un resumen de la cantidad de emulsión asfáltica a aplicar para cada tipo de muestra según la metodología de dosificación.

Cuadro 11. Cantidad de emulsión asfáltica a aplicar según metodología de dosificación por peso

| **Tipo de geotextil** | **Aplicación por peso (g)** | | **TOTAL** |
|---|---|---|---|
| | **Primera aplicación 80%** | **Segunda aplicación 20%** | |
| MacTex® N 27.1 | 24,86 | 6,22 | 31,08 |
| MacTex® N 40.1 | 29,83 | 7,46 | 37,29 |

## 3.2. Ensayos de laboratorio

### 3.2.1. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Este ensayo se aplicó a dos muestras de geotextil no tejido de polipropileno de distintos gramajes: uno de 140 g/m$^2$ (MacTex® N 27.1) y otro de 203 g/m$^2$ (MacTex® N 40.1). Primero se aplicó el ensayo a temperatura ambiente a cada tipo de muestra, y posteriormente se ensayaron muestras acondicionadas previamente a las temperaturas de 60 °C, 80 °C, 150 °C y 170 °C con el fin de detallar la morfología y arreglo estructural del geotextil a distintas temperaturas.

Para los casos de acondicionamiento térmico se introdujeron las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 al horno (previamente calentado) a las temperaturas de 60 °C, 80 °C, 150 °C y 170 °C, respectivamente, se mantuvieron en el horno por una hora, se sacaron y se dejaron enfriar para posteriormente ser ensayadas.

La ejecución del ensayo se lleva a cabo de la siguiente forma:

a) Se verifica que el plato donde se coloca la muestra esté limpio
b) Se recubre la muestra con una capa delgada de oro para aportarle el carácter conductor requeridos, tal como se muestra en la Figura 26.

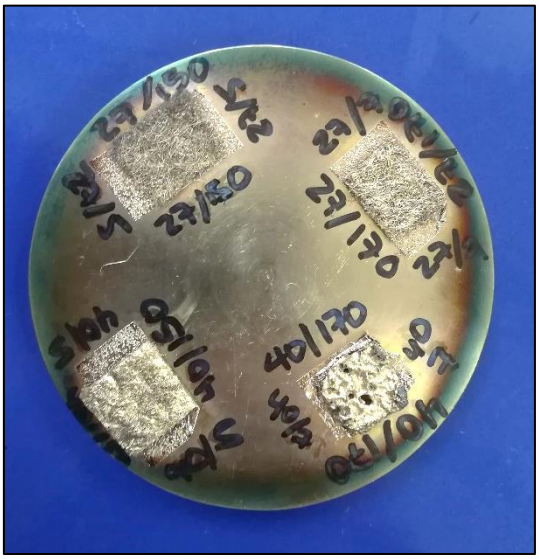


Figura 26. Muestras de geotextil no tejido de polipropileno recubiertas para la aplicación de la técnica SEM

c) Se introducen las muestras en el equipo (Figura 27).

Figura 27. Microscopio Electrónico de Barrido S-3700N

d) Se hace incidir un haz de electrones acelerados sobre la muestra de 15000 voltios.
e) Se ubica el lente en el punto donde se requiere tomar la fotografía.
f) Se decide la resolución.
g) Se mide el diámetro de las fibras.
h) Se enfoca el área de interés.
i) Se captura la fotografía.

Para cada una de las muestras se extrajeron imágenes formadas tanto por electrones secundarios por lo que se obtuvieron las características de la superficie de las muestras.

### 3.2.2. Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

Este ensayo se aplicó a dos muestras de geotextil no tejido de polipropileno de distintos gramajes: uno de 140 g/m$^2$ (MacTex® N 27.1) y otro de 203 g/m$^2$ (MacTex® N 40.1). En primera instancia, para caracterizar cada geotextil en su estado inicial, se ensayaron las muestras a temperatura ambiente. Posteriormente se sometió cada geotextil a distintas temperaturas (60 °C, 80 °C, 150 °C y 170 °C) y se obtuvieron los nuevos espectros.

Para los casos de acondicionamiento térmico se procedió de igual forma a la preparación de las muestras para la técnica de SEM, es decir, se introdujeron las muestras MacTex® N 27.1 y

MacTex® N 40.1 al horno (previamente calentado) a las diferentes temperaturas, se mantuvieron en el horno por una hora, se sacaron y se dejaron enfriar por 20 minutos.

Debido a que se trabajó con el ATR la muestra se preparó doblándola en varias partes con el fin de que tuviera un grosor adecuado y no se escapara el haz de luz infrarroja. La muestra se colocó tal como se muestra en la Figura 28.

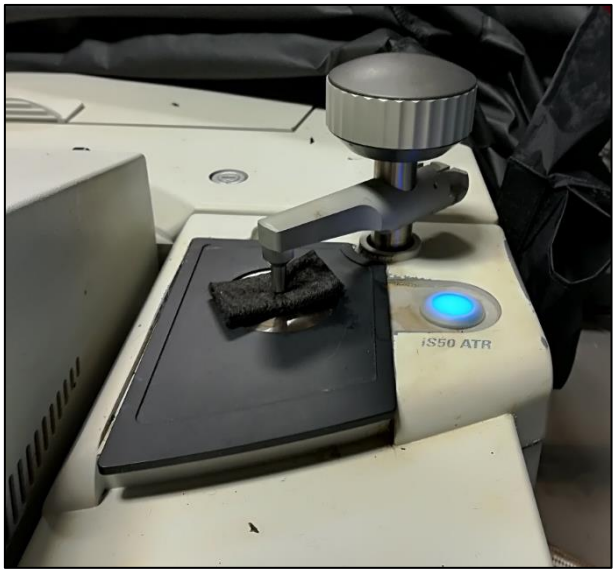



Figura 28. Aplicación del ensayo FTIR a la muestra de geotextil no tejido de polipropileno

La ejecución del ensayo se lleva a cabo de la siguiente forma:

j) Se verifica que el plato donde se coloca la muestra esté limpio
k) Se enciende la celda ATR
l) Se purga el equipo con nitrógeno con el fin de mejorar la relación señal/ruido y obtener espectros más limpios (este paso no es necesario realizarlo cada vez que se utiliza el equipo, sino solo cuando existe ruido en el espectro)
m) Se recolecta el espectro sin la muestra, con el fin de que el espectro ambiente sea restado
n) Se coloca la muestra sobre la punta de diamante y se recolecta de nuevo el espectro

Los espectros registrados mediante FTIR, utilizando el modo ATR, muestran una serie de bandas que proporcionan información de las muestras estudiadas. Se obtuvo tres espectros para cada condición de la muestra, con el fin de comparar cada uno de estos y eliminar posibles espectros erróneos donde se haya escapado el haz de luz infrarroja.

### 3.2.3. Análisis Termogravimétrico (TGA)

Este ensayo se aplicó a dos muestras de geotextil no tejido de polipropileno de distintos gramajes: uno de 140 g/m$^2$ (MacTex® N 27.1) y otro de 203 g/m$^2$ (MacTex® N 40.1). Para evaluar el efecto que tiene la temperatura sobre el geotextil, no fue necesario realizar un acondicionamiento térmico (como el ensayo FTIR), ya que durante el ensayo de TGA la temperatura de la muestra va aumentando de manera controlada.

El analizador termogravimétrico que posee el LanammeUCR es marca TA Instruments serie Q5000, sus partes principales se muestran en la Figura 29.

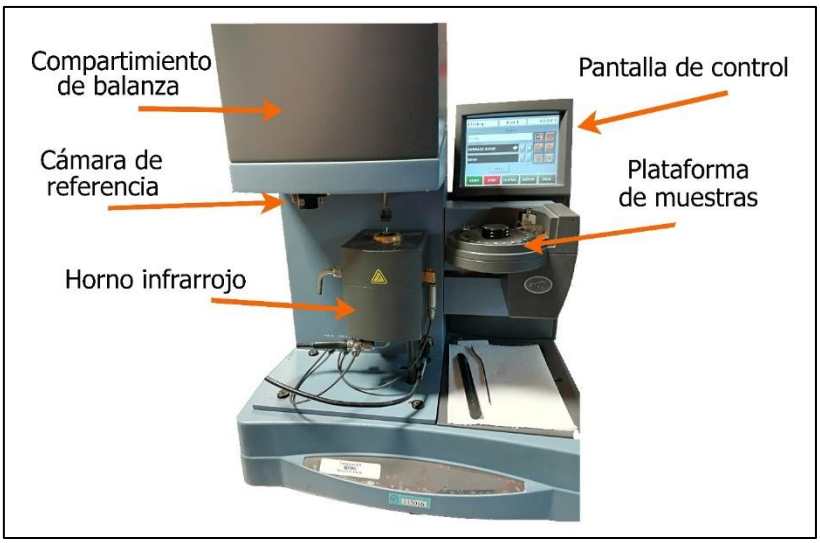



Figura 29. Partes principales del analizador termogravimétrico Q5000 de TA Instruments

La balanza es la parte clave del equipo ya que esta registra la masa inicial de la muestra, los cambios de masa durante el análisis y la masa final de la muestra con una precisión de $\pm 1\ \mu g$. La temperatura de análisis la provee el horno infrarrojo, además este regula la tasa de variación de temperatura; al ser del tipo infrarrojo permite una mayor velocidad de calentamiento y una mayor velocidad de enfriamiento. En la cámara del horno existe un sensor de temperatura de alta precisión, el cual registra la temperatura constantemente y evita que el sistema sobrepase la temperatura fijada. Además, la balanza posee un aislamiento térmico que evita ser afectada por la temperatura. (Rodríguez y Villegas, 2012)

El equipo permite hacer mediciones desde los 5 °C hasta los 1000 °C, con una velocidad de calentamiento de 0 °C/min (cuando se generan isotermas) hasta 300 °C/min, con una precisión

de $\pm$ 1 %. En este proyecto se utilizó una tasa de calentamiento de 10 °C/min desde 5 °C hasta 900 °C.

El método aplicado se basa en la norma ASTM E1131, la cual indica en la sección de preparación del espécimen de prueba, que, si la muestra es sólida se puede proseguir de dos maneras: tomar varias muestras de diferentes áreas y combinarlas para tener una sola o bien ejecutar varios ensayos por separado y en el análisis final obtener un promedio de los resultados. Para este proyecto se optó por realizar tres ensayos a cada muestra de geotextil, es decir, tres pruebas a MacTex® N 27.1 y otras tres a MacTex® N 40.1.

Para el caso específico del equipo empleado la masa de la muestra no debe sobrepasar los 50 mg. Con el fin de que el geotextil se acomodara uniformemente en el contenedor de platino, se redujo la muestra para que no excediera los bordes del mismo, a una masa aproximadamente de 5 mg, tal como se presenta en el espacio 1 de la Figura 30.

Figura 30. Colocación del geotextil no tejido de polipropileno en el portamuestras para el ensayo de TGA

Como se mencionó anteriormente el método aplicado se basa en la norma ASTM E1131, sin embargo, se realizaron ciertas modificaciones, por lo que a continuación se describe el procedimiento específico aplicado en el LanammeUCR para el análisis termogravimétrico de polímeros:

a) Se deja fluir nitrógeno de ultra pureza (UHP) con una presión de flujo de 957,6 Pa (20 psi) al menos dos minutos antes de encender el equipo, esto debido a que el polímero

analizado requiere de una atmósfera inerte. También debe abrirse el aire grado cero con la misma presión.

b) Se enciende el equipo y se mantiene encendido una hora para calibrar sus condiciones, según la recomendación del fabricante (durante este periodo se puede colocar los contenedores con las submuestras en la plataforma de muestras, se puede colocar hasta un máximo de 25 muestras para que sean cargadas automáticamente, como se puede observar en la Figura 30.
c) Se inicia el programa TGA desde la pantalla de control, para que se inicien las pruebas internas y comprobar que el funcionamiento es el adecuado.
d) Se activa el software (en la computadora) que controla las condiciones del ensayo "*TA Instruments Explorer*", el cual comprueba la comunicación con el TGA y su funcionamiento.
e) En el software se establece la posición de la muestra en la plataforma de muestras, para que este seleccione la adecuada.
f) Se tara el brazo de transporte de muestras.
g) Se fija una razón de calentamiento de 10 °C/min desde 5 °C hasta 900 °C y se comprueba que se esté registrando la temperatura.
h) Se verifica el flujo del nitrógeno y del aire.
i) Se le indica al software que el brazo transportador recolecte la muestra, la transporte hasta la balanza y registre la masa. Al tratarse de una muestra tan pequeña (5 mg aproximadamente) es recomendable esperar a que se estabilice la masa antes de iniciar el ensayo.
j) El sistema eleva la cámara térmica hacia la posición de la muestra, cierra el sistema e inicia el ensayo con las condiciones establecidas.
k) Cuando se ha alcanzado la temperatura máxima, el equipo lo indica e inicia el enfriamiento. Posteriormente se extrae la muestra asegurándose de que no queden restos dentro de la cámara del horno, se cierran las líneas de gas, se cierra el software y se apaga el TGA.

El termograma registrado contiene toda la información de la muestra, masa de la muestra inicial, método (dinámico o isotérmico), la fecha, el operador del equipo e incluso la ruta de almacenamiento de datos. En este se expresa le pérdida de masa como porcentaje o bien en

miligramos. Debido a que en el caso de polímeros se desconoce su comportamiento, se decide utilizar toda la rampa de temperatura disponible.

### 3.2.4. Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)

Se aplicó el ensayo bajo el método de calorimetría diferencial de barrido de potencia compensada, el cual consiste en determinar la diferencia entre la cantidad de calor que fluye hacia la muestra y la cantidad de calor que fluye hacia la referencia, en la medida en que la temperatura se modifica linealmente, tal como se explicó en la sección 2.6.4.

Similar al ensayo de TGA, se aplicó el procedimiento a dos muestras de geotextil no tejido de polipropileno de 140 g/m$^2$ (MacTex® N 27.1) y de 203 g/m$^2$ (MacTex® N 40.1). De igual forma para evaluar el efecto que tiene la temperatura sobre el geotextil, no fue necesario realizar un acondicionamiento térmico (como el ensayo FTIR), ya que durante el ensayo de DSC la temperatura de la muestra varía linealmente.

El calorímetro de barrido diferencial que posee el LanammeUCR es marca TA Instruments serie Q2000-2220, sus partes principales se muestran en la Figura 31.

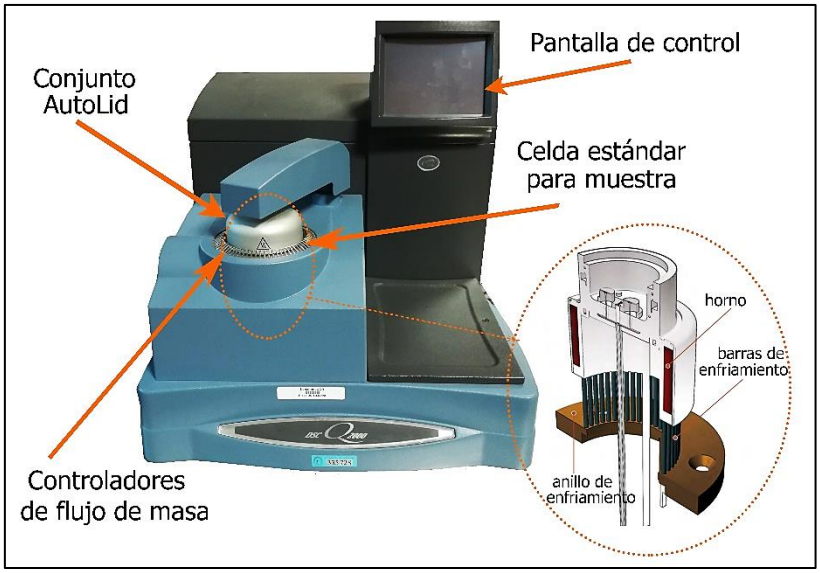



Figura 31. Partes principales del calorímetro diferencial de barrido Q2000-2220 de TA Instruments

El método aplicado se basa en la norma ASTM D3418, la cual indica en la sección de preparación del espécimen de prueba, que, para muestras de película o lámina se debe cortar de tal modo que quepa en la cápsula. La muestra de geotextil se redujo a unos 5 mg

aproximadamente. Además, con el fin de que la muestra fuera representativa, se aplicó el ensayo a 3 especímenes obtenidos de diferentes puntos del rollo de textil, tanto del MacTex® N 27.1 como del MacTex® N 40.1.

Las muestras ya cortadas se trasladan a la cápsula, se les coloca la tapa y se sellan mediante una prensa para impedir que, por problema de dilatación o descomposición de la muestra, ésta se proyecte fuera de la cápsula contaminando la cavidad del equipo. Además, las cápsulas de la muestra y la referencia se colocan de tal forma que abarquen la mayor superficie de contacto posible con el foco calefactor, de modo que el calor se distribuya de manera homogénea, tal como se muestra en la Figura 32.

Figura 32. Colocación de las cápsulas de referencia y la muestra de geotextil no tejido de polipropileno en el equipo de DSC

Es importante mencionar que la manipulación de las muestras se debe hacer con unas pinzas y no con la mano, ya que la grasa de la piel puede aportar masa y variar las características al espécimen.

El método aplicado se basa en las normas ASTM D3418, sin embargo, se realizaron ciertas modificaciones, por lo que a continuación se describe el procedimiento específico aplicado en el LanammeUCR para el análisis de polímeros:

a) Se deja fluir nitrógeno de ultra pureza (UHP) y el aire grado cero al menos dos minutos antes de encender el equipo, esto debido a que el polímero analizado requiere de una atmósfera inerte.
b) Se enciende el equipo y se mantiene encendido una hora para calibrar sus condiciones, según la recomendación del fabricante.

c) Se inicia el programa DSC desde la pantalla de control, para que se inicien las pruebas internas y comprobar que el funcionamiento es el adecuado.
d) Se activa el software (en la computadora) que controla las condiciones del ensayo "*TA Instruments Explorer*", el cual comprueba la comunicación con el DSC y su funcionamiento.
e) Se abre la tapa del equipo y se coloca la cápsula con la muestra (previamente pesada) y se verifica que la cápsula de referencia esté correctamente colocada.
f) Se cierra la tapa del equipo y se introducen los valores de la masa de la muestra, la masa de la cápsula más la tapa (la cual contiene a la muestra) y la masa de la cápsula de referencia más la tapa.
g) Se personaliza la razón de calentamiento a una rampa de 20 °C/min desde 40 °C hasta 190 °C, luego se enfría 20 °C/min desde 190 °C hasta -90 °C donde se hace una isoterma de 1 min, en este procedimiento el equipo no registra los datos, sino que se hace con la finalidad de que se borre el historial térmico.
h) Posteriormente, el equipo empieza a tomar datos y corre a una tasa de calentamiento de 10 °C/min desde -90 °C hasta 190 °C.
i) Cuando se ha alcanzado la temperatura máxima, el equipo lo indica e inicia el enfriamiento. Posteriormente se extrae la muestra asegurándose de que no queden restos dentro de la cámara del horno, se cierran las líneas de gas, se cierra el software y se apaga el DSC.

### 3.2.5. Goniometría

Los ensayos se realizaron con el propósito de cuantificar qué tan fuerte es la interacción entre las moléculas del asfalto y el geotextil, relativo a la interacción intermolecular de cada material. Debido a que no se tienen datos previos de la interacción asfalto-geotextil se realizaron diversas configuraciones con el fin de comparar los resultados. Este ensayo se realizó con las dos muestras de geotextil no tejido de polipropileno (MacTex® N 27.1 de 140 g/m$^2$ y MacTex® N 40.1 de 203 g/m$^2$), con una piedra caliza y con una piedra sílicea.

Las mediciones del ángulo de contacto se realizaron a 22 °C $\pm$ 3 °C con un goniómetro Ramé-hart, modelo 250, el cual se muestra en la Figura 33 y el programa Drop Image Advanced. El goniómetro consiste en un equipo óptico capaz de capturar el perfil de un líquido (asfalto) sobre un sustrato sólido (geotextil o agregado), y se basa en el principio de la gota sésil, el

cual se utilizaba originalmente en la industria de pinturas y pigmentos, pero se adaptó para utilizarlo en asfaltos. El equipo utiliza una cámara de alta resolución y un software de procesamiento de imágenes para capturar y analizar el ángulo de contacto. (Aguiar, Leiva, Salazar, Baldi, Villegas y Loría, 2014)

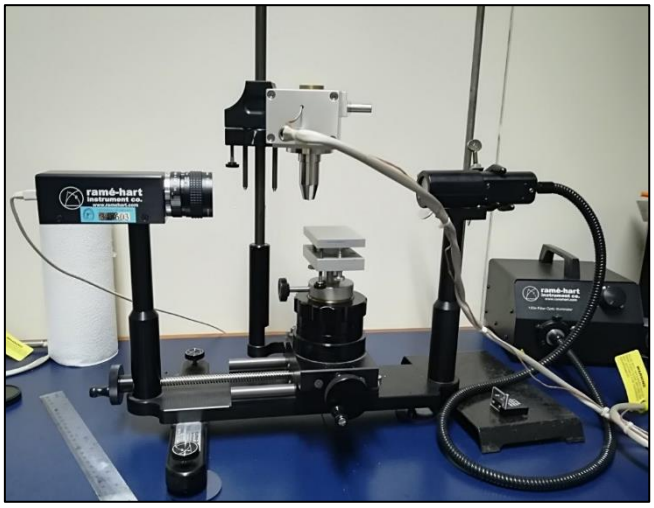



Figura 33. Goniómetro Ramé-hart

El equipo de goniometría se modula de dos maneras distintas: con un gotero manual o con una jeringa dispensadora a través de un controlador de temperatura, tal como se puede observar en la Figura 34. En este proyecto se utiliza la segunda opción la cual vierte gotas de asfalto a temperatura controlada.

Figura 34. Equipo de goniometría (a) con gotero manual (b) con jeringa dispensadora y controlador de temperatura

Fuente: LanammeUCR, 2016
Modificado por: Gómez, 2019

Para generar las gotas de asfalto en caliente primero se coloca el asfalto en el horno a una temperatura de 140 °C durante 120 minutos. Trascurrido ese tiempo se insertan pipetas Pasteur cortadas a la misma altura dentro del beaker con asfalto, tal como se muestra en la Figura 35, y se dejan en el horno al menos 60 minutos. El asfalto utilizado para llenar las pipetas proviene de la destilación de la emulsión CRS-1 de RECOPE, la cual posee un 66,9 % de asfalto recuperado.

Figura 35. Llenado de pipetas Pasteur con asfalto

Una vez llenadas las pipetas Pasteur con asfalto, se sacan con cuidado y se limpian exteriormente con canfín para que no queden residuos, tal como se muestra en la Figura 36.

Figura 36. Limpieza de pipetas Pasteur

Las muestras de agregado son cortadas de rocas quebradas o extraídas con extractor de núcleos. Las caras a evaluar se pulen utilizando una lija de agua grado 280, con el fin de asegurar una rugosidad uniforme y consistente entre muestras. Posteriormente, las muestras se colocan en un baño ultrasónico para remover cualquier residuo de la superficie.

Las muestras de geotextil se aplanan colocándole una presión encima, con el fin de evitar zonas con cerdas sobresalientes de la superficie del polímero (ya que estas provocan interferencia al capturar las imágenes con el lente óptico).

Un mínimo de 6 réplicas de cada combinación de materiales fueron medidas para estimar el ángulo de contacto, $\theta_c$, mediante la jeringa de calentamiento y control de temperatura. Las gotas de ligante asfáltico se colocan a una altura de 2,54 cm (1 in), como se muestra en la Figura 37.

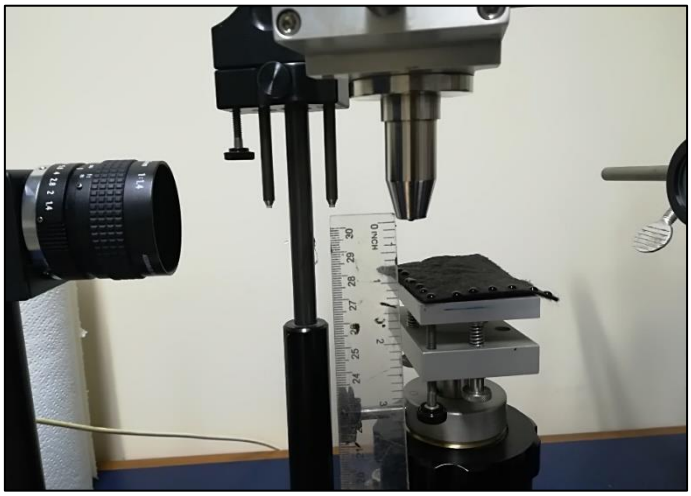
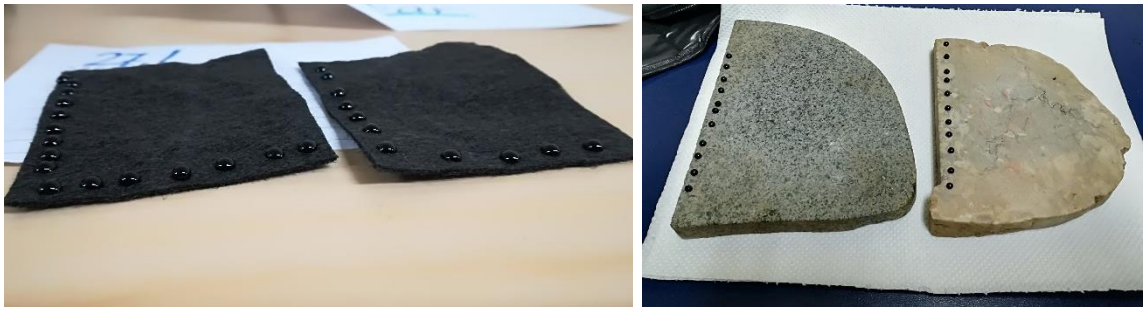


Figura 37. Colocación de jeringa dispensadora con control de temperatura

Antes de realizar las mediciones de ángulo de contacto, se preparó cada combinación de materiales: geotextil MacTex® N 27.1 – ligante asfáltico, geotextil MacTex® N 40.1 – ligante asfáltico, agregado calizo – ligante asfáltico y agregado silíceo – ligante asfáltico, dichas combinaciones se muestran en la Figura 38. Las gotas se colocaron a 165 °C y las mediciones de ángulo de contacto se realizaron a temperatura ambiente.



(a) (b)

Figura 38. Preparación de muestras (a) geotextil – asfalto (b) agregado – asfalto

El método aplicado se basa en las normas ASTM D5725, ASTM D7334 y ASTM D7490, por lo que a continuación se describe el procedimiento específico aplicado en el LanammeUCR:

a) Preparación de las muestras
    - Se llenaron de asfalto las pipetas Pasteur.
    - Se coloca la muestra sólida en la base del equipo y se nivela.
    - Se coloca la jeringa dispensadora con control de temperatura a 1 in de la superficie de la muestra sólida y se calentó a 165 °C.
    - Se ajusta la posición de la superficie de la muestra y la punta de suministro de líquido, de tal forma que las gotas se coloquen cercanas al borde.
    - Una vez caliente el sistema se coloca la pipeta Pasteur dentro de la jeringa dispensadora.
    - Se aplicaron las gotas sobre el borde de la superficie de la muestra. Cabe resaltar que para el análisis no se contabilizó la primera gota de salida.
b) Preparación del equipo
    - Se verifica que la base del equipo esté nivelada (sin la muestra).
    - Se enciende la luz.
    - Se coloca la esfera de calibración (Figura 39), se enfocó la cámara y se ubican los límites superior, inferior y central de medición (Figura 40), con el fin de que la imagen de la gota puede ser capturado.

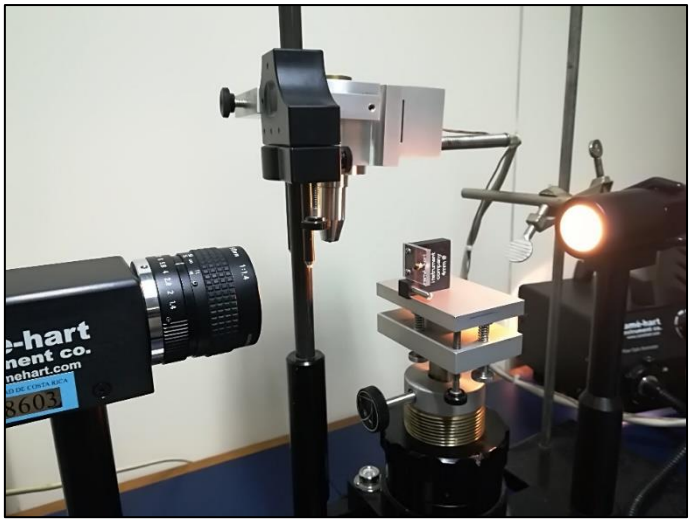


Figura 39. Colocación de la esfera de calibración

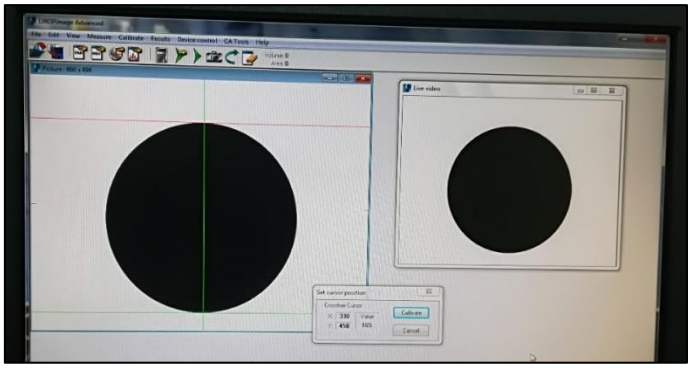


Figura 40. Ubicación de los límites de medición

c) Medición de ángulos de contacto

- Se coloca la muestra y se nivela (Figura 41).

Figura 41. Nivelación de la muestra

- Se captura la imagen de la gota.
- Se ubicaron los límites central, superior e inferior.
- Se realiza la medición del ángulo de contacto en cada uno de los bordes de la gota.

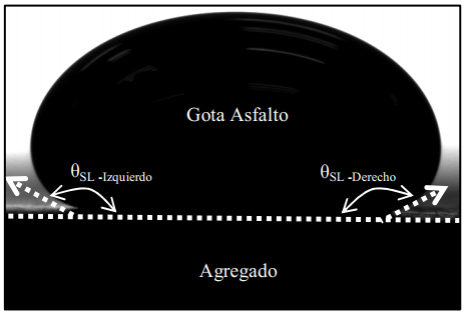



Figura 42. Medición del ángulo de contacto, $\boldsymbol{\theta_c}$, en cada borde de la gota de asfalto

- Se cambia la posición de la muestra y se repite el procedimiento de medición, hasta evaluar 6 gotas de asfalto.

d) Procesamiento de datos
   - Se comparan los resultados del ángulo de contacto derecho e izquierdo para cada una de las gotas, si estos difieren en más de 2 ° los valores se eliminan y se repite la medición.
   - El ángulo de contacto para cada espécimen es el promedio de los seis ángulos medidos.

### 3.2.6. Resistencia a la tensión GRAB

El ensayo se realizó a distintas muestras con el propósito de caracterizar mecánicamente el geotextil no tejido de polipropileno y verificar la resistencia a la tracción GRAB. Este se aplicó a cuatro tipos de muestra:

- 6 especímenes de geotextil MacTex® N 27.1 de 140 g/m$^2$ sin impregnar (condición original).
- 6 especímenes de geotextil MacTex® N 27.1 de 140 g/m$^2$ impregnados con emulsión asfáltica.
- 6 especímenes de geotextil MacTex® N 40.1 de 203 g/m$^2$ sin impregnar (condición original).

- 6 especímenes de geotextil MacTex® N 40.1 de 203 g/m$^2$ impregnados con emulsión asfáltica.

El ensayo se basa en la Norma ASTM D4632 por lo que los especímenes se cortaron de forma rectangular con dimensiones de 101,6 mm por 203,2 mm (4 in por 8 in), se prepararon e identificaron 6 especímenes para cada tipo de muestra a evaluar, tal como se presenta en la Figura 43.

Figura 43. Muestras para ser ensayadas a resistencia a la tensión GRAB

Posteriormente se dibujó una línea a 38 mm (1,5 in) desde el borde superior e inferior de la muestra en todo el ancho, debido a que se trata de una tela no tejida la línea dibujada es paralela a los hilos a lo largo de la muestra, tal como lo indica la norma, lo cual se puede observar en la Figura 44.

Figura 44. Demarcación de muestras para ser evaluadas en el ensayo de resistencia a la tensión GRAB

Para impregnar las muestras de geotextil se siguió la metodología de aplicación por peso descrita en la sección 3.1.2. En la Figura 45 se muestra la emulsión asfáltica utilizada y el resultado del geotextil impregnado.

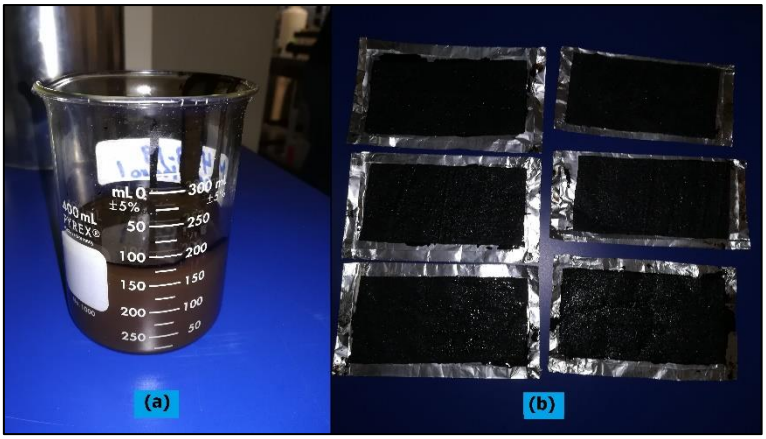



Figura 45. (a) Emulsión asfáltica CRS-1 y (b) muestras de geotextil no tejido impregnadas con emulsión asfáltica

A continuación, se describe el procedimiento específico de ensayo aplicado en el LanammeUCR, bajo la norma ASTM D4632:

a) Se ajustan las mordazas al inicio del ensayo a 75 ± 1mm. Se fija la carga de la máquina de manera que el valor máximo se presente entre 10% y 90% de la escala total de carga y se define una velocidad de 300 ± 10 mm/min.
b) Se asegura el espécimen con las mordazas colocando el largo lo más paralelo posible a la dirección de aplicación de la carga, tal como se muestra en la Figura 46, además se verifica que las mordazas estén céntricas respecto una con otra y con el material de prueba.
c) Se procede a realizar la prueba de tensión GRAB, tal como se muestra en la Figura 47.
d) Si el geotextil se desliza o se rompe en el borde de las mordazas o en éstas o si debido a alguna falla de operación el resultado desciende notablemente en comparación con el grupo de muestras evaluado, se debe descartar y tomar otro espécimen.
e) La curva de elongación o desplazamiento en función de la fuerza, se toma desde el eje de carga cero hasta la fuerza máxima aplicada (resistencia máxima).

Figura 46. Configuración de ensayo de resistencia a la tensión GRAB

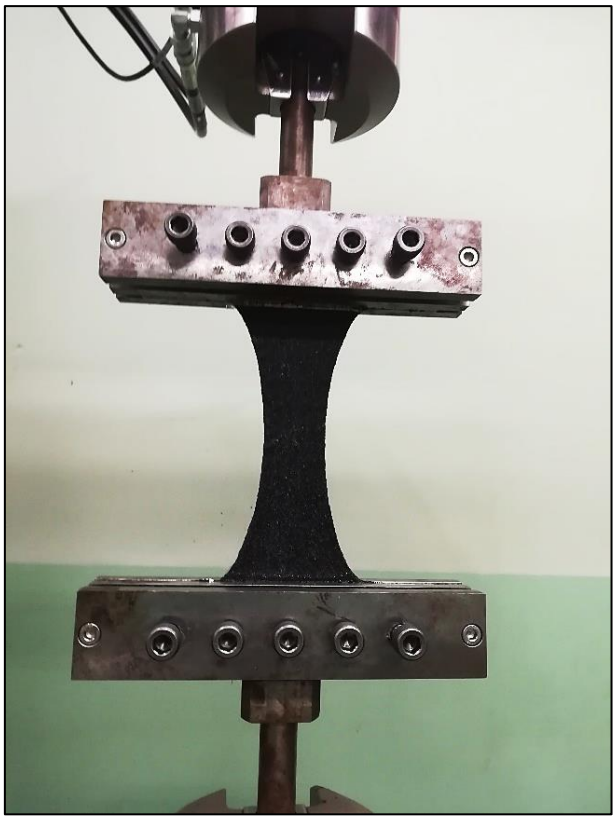


Figura 47. Aplicación de la prueba de resistencia a la tensión GRAB

## 3.3. Análisis de Resultados

### 3.2.1. Caracterización física

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

De la Figura 48 a la Figura 57 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno para los distintos gramajes a distintas temperaturas. Las fotografías se obtuvieron a varias resoluciones con el fin de observar de mejor manera los cambios de forma de las fibras a distintas temperaturas. En el pie de cada fotografía se indica el tipo de geotextil, la resolución, el tipo de ensayo y la fecha de toma de datos. Los resultados de SEM corresponden a la radiación de electrones secundarios.

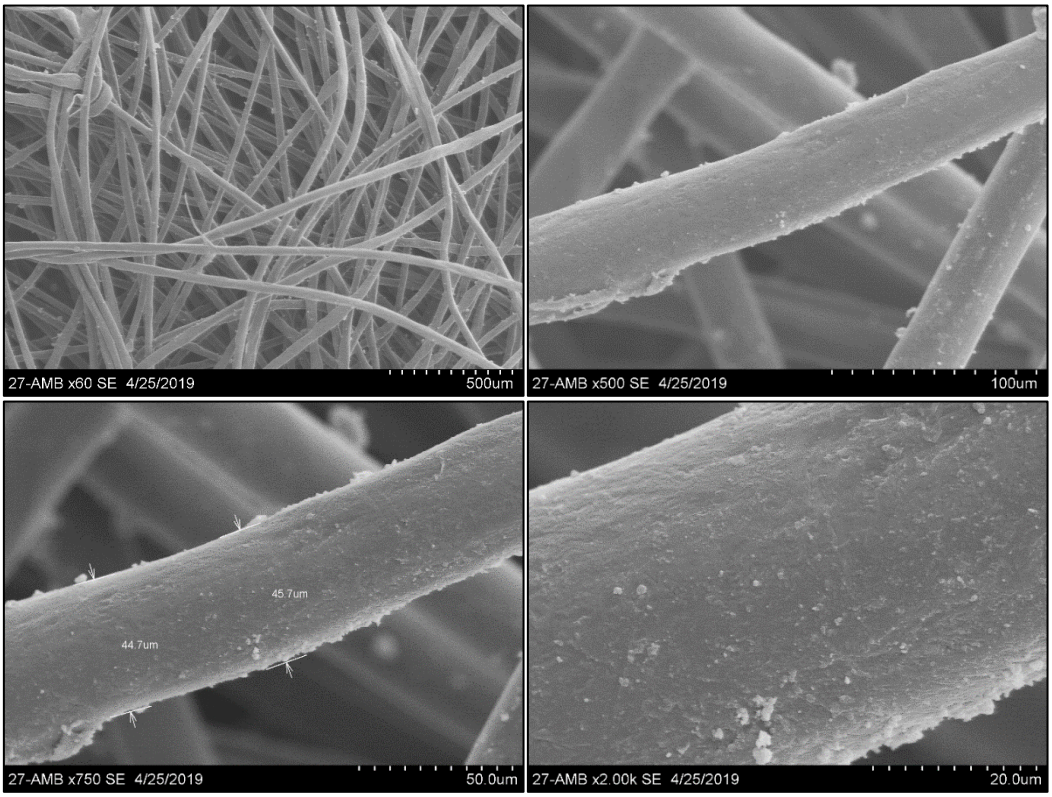



Figura 48. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 a temperatura ambiente

En la Figura 48 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno, donde se observan filamentos continuos, acomodados de manera heterogénea en toda el área. Las fibras poseen un diámetro de 45,2 $\mu m$ aproximadamente. Tal como lo indican Meira y Gugliotta (2016) el polipropileno es una fibra orgánica sintética polimérica de cadena larga y lineal, este

pertenece a la familia de las olefinas-poliolefinas que se origina por la polimerización del propileno.

En la Figura 49 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 60 °C, en la cual se observan filamentos continuos acomodados de manera heterogénea en toda el área, de forma similar a los vistos a temperatura ambiente. Las fibras poseen un diámetro de 45,3 $\mu m$ aproximadamente.

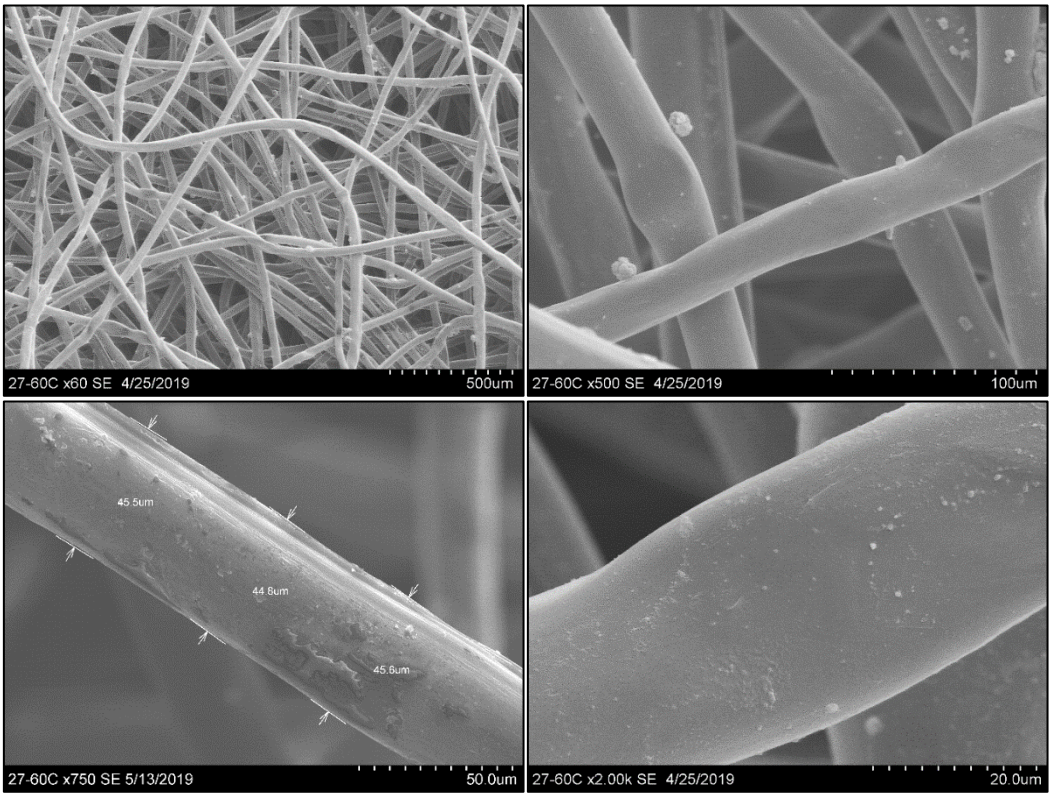



Figura 49. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 60 °C

En la Figura 50 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 80 °C, donde se presentan filamentos continuos acomodados de manera heterogénea en toda el área. Las fibras poseen un diámetro de 35,9 $\mu m$ aproximadamente.

En la Figura 51 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 150 °C, donde de igual forma a los casos anteriores se presentan filamentos continuos acomodados de manera heterogénea en toda el área, sin embargo las fibras empiezan a presentar grietas y el diámetro se reduce a 35,3 $\mu m$ en promedio.

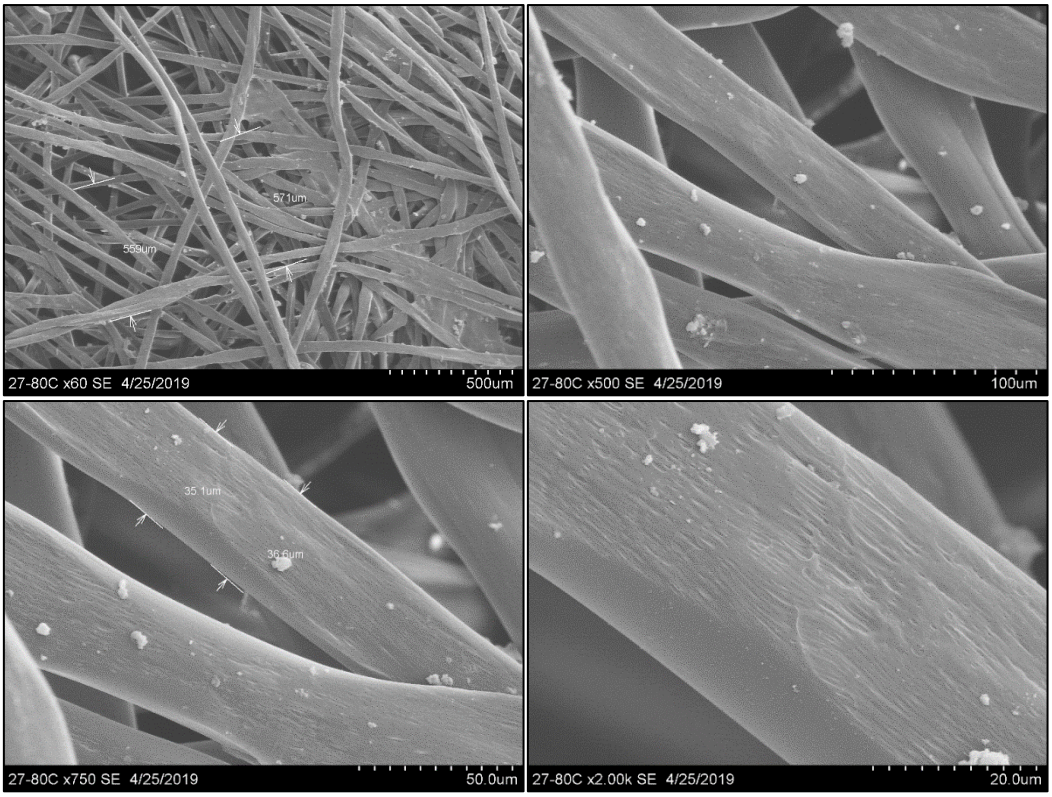



Figura 50. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 80 °C

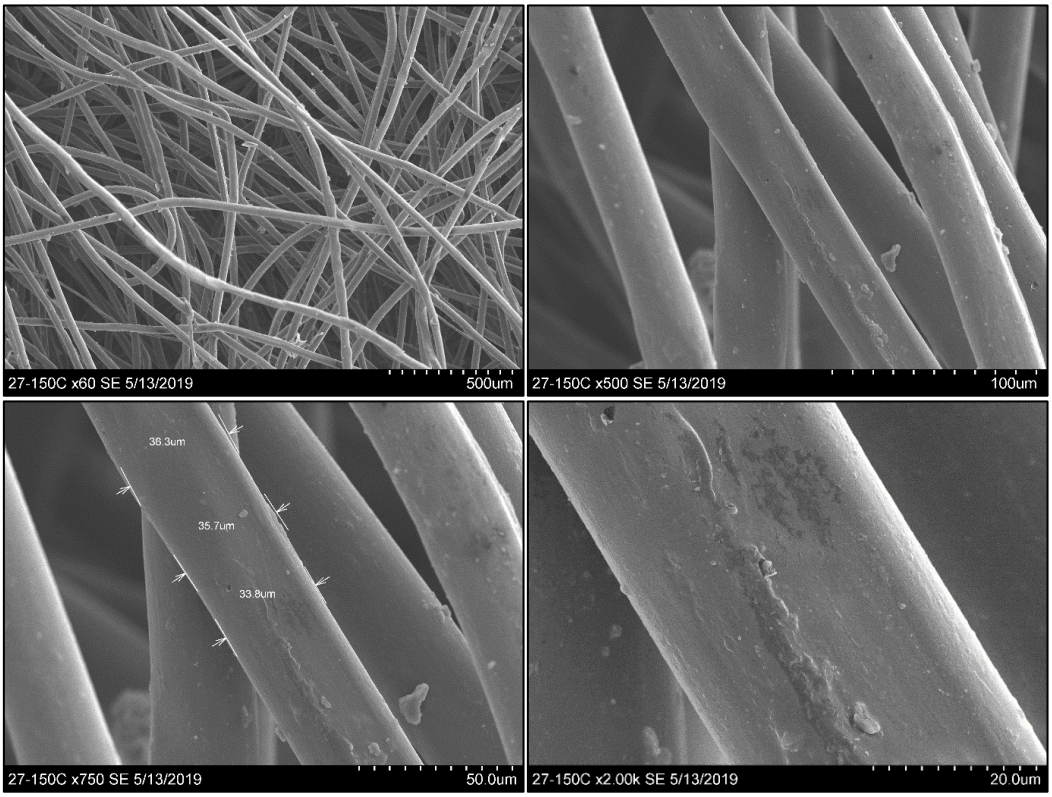



Figura 51. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 150 °C

En la Figura 52 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 170 °C, en esta ya no se muestran filamentos continuos, sino las fibras rotas acomodadas de manera heterogénea en toda el área. El diámetro promedio de la fibra analizada es de 36,5 $\mu m$.

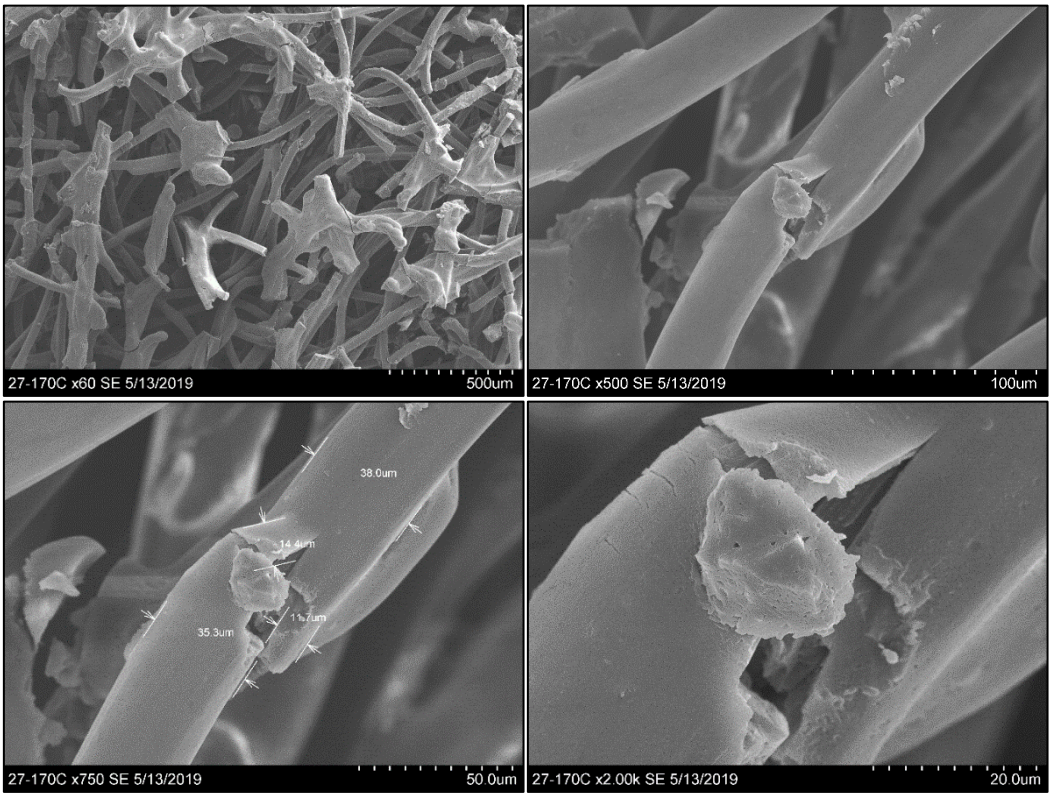



Figura 52. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 27.1 acondicionado a 170 °C

En la Figura 53 se muestra la morfología del geotextil MacTex® N 40.1 a temperatura ambiente, donde se observan filamentos continuos, acomodados de manera heterogénea en toda el área y con mayor densidad de fibras en comparación con la micrografía del geotextil de menor gramaje de la Figura 48. Las fibras poseen un diámetro de 37,0 $\mu m$ en promedio.

En la Figura 54 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 60 °C, donde se observan filamentos continuos, acomodados de manera heterogénea en toda el área. Las fibras poseen un diámetro de 39,5 $\mu m$ en promedio.

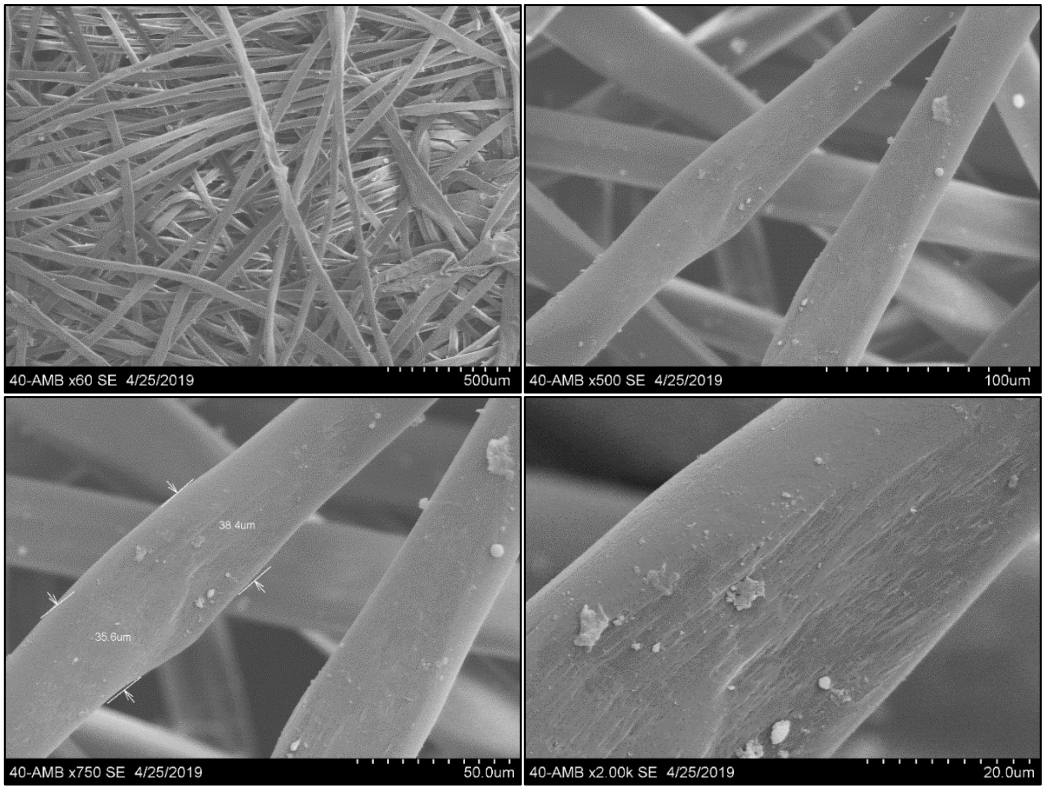



Figura 53. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 a temperatura ambiente

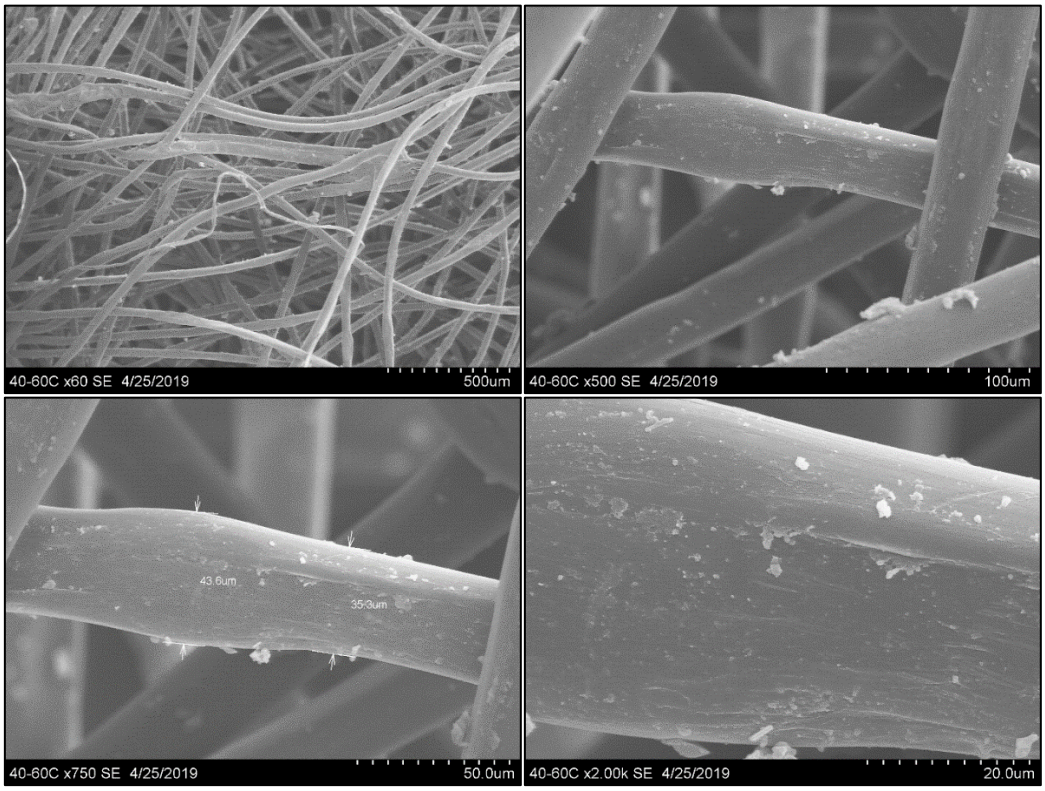



Figura 54. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 60 °C

En la Figura 55 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 80 °C, donde se observan filamentos continuos, acomodados de manera heterogénea en toda el área. La fibra analizada posee un diámetro de 39,7 $\mu m$ en promedio.

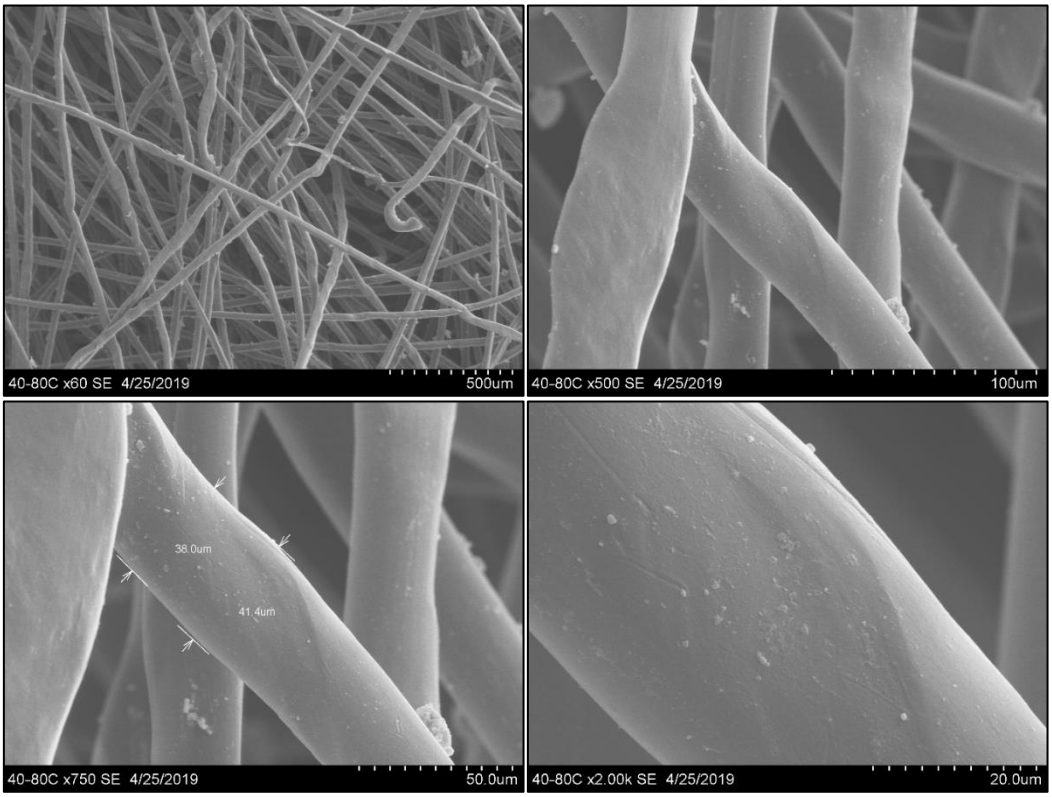



Figura 55. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 80 °C

En la Figura 56 se muestra la morfología del geotextil no tejido acondicionado a 150 °C, en esta se observa una unión de las fibras de polipropileno, lo cual se atribuye al efecto térmico. En esta condición se empieza a notar un cambio físico del material, donde los filamentos se empiezan a desgastar y a agrietar. La fibra analizada posee un diámetro de 42,4 $\mu m$ en promedio.

En la Figura 57 se muestra la morfología del geotextil no tejido de polipropileno acondicionado a 170 °C, en esta ya no muestran filamentos continuos marcados, sino fibras unidas entre sí debido al efecto térmico, el cual produce un cambio en la forma del material. Además, se observan grietas en varias zonas. La fibra estudiada posee un diámetro de 48,9 $\mu m$ en promedio.

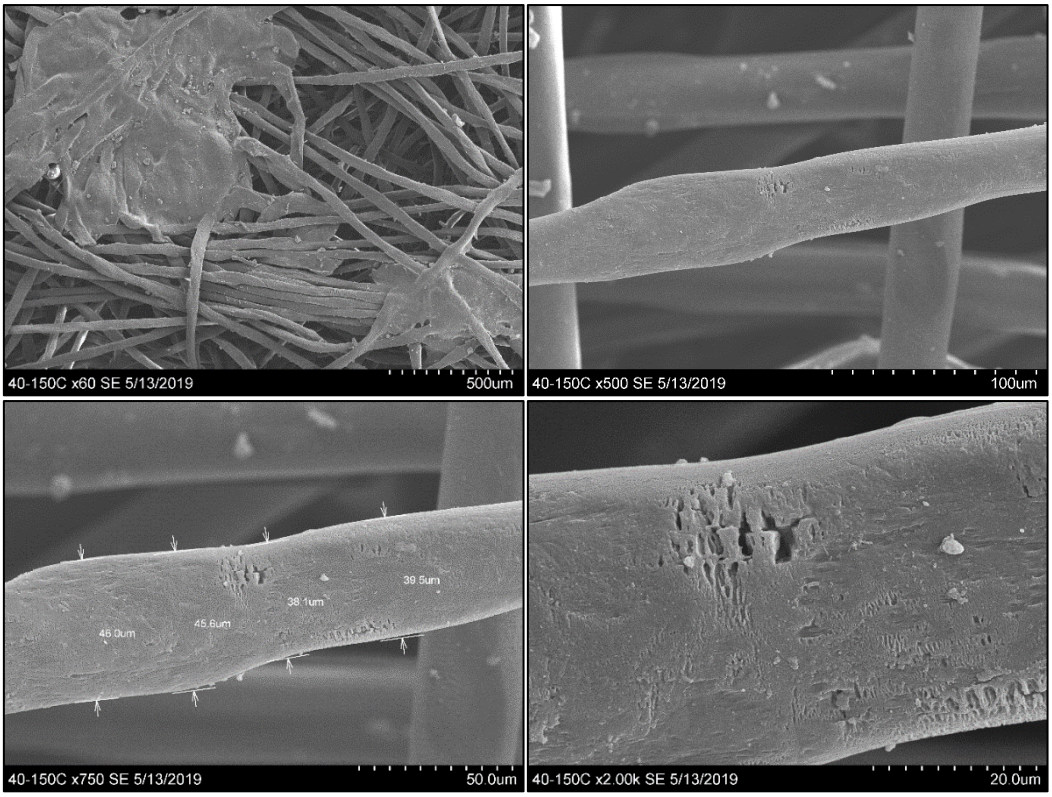



Figura 56. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 150 °C

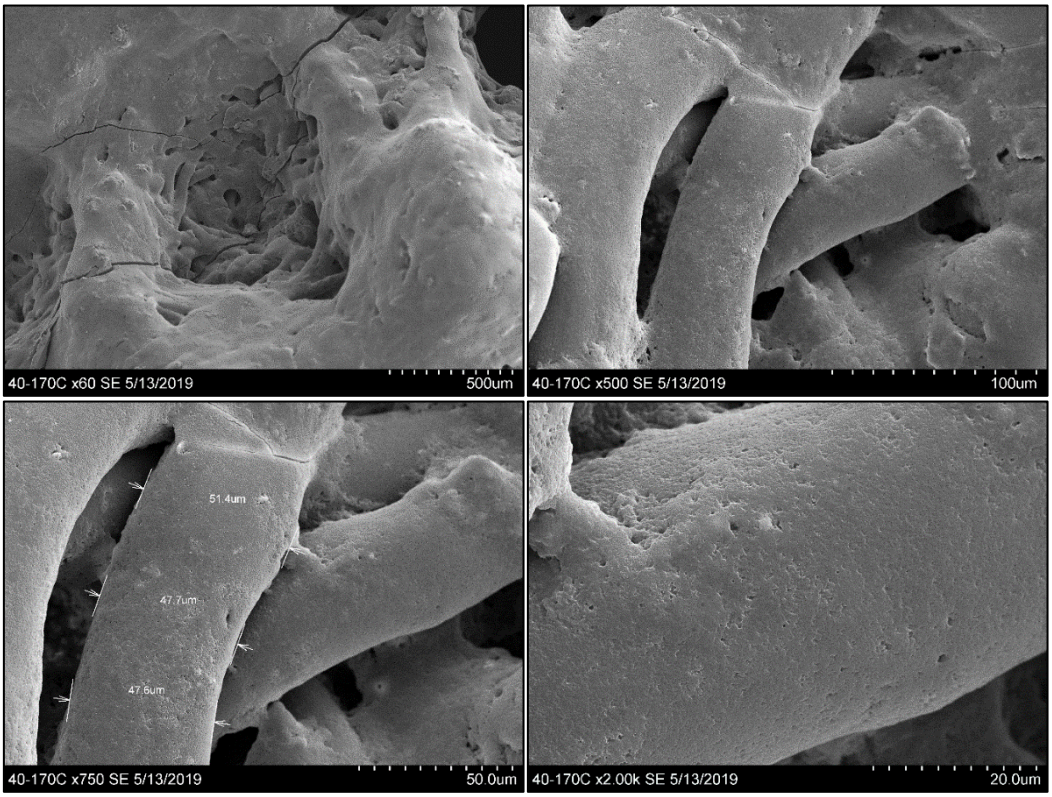



Figura 57. Micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex N 40.1 acondicionado a 170 °C

En la Figura 58 se muestran las micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex® N 27.1 a temperatura ambiente y a las diversas temperaturas a las que se acondicionó. Al comparar estas fotos, se observa que los filamentos de polipropileno no sufren cambios cuando se acondicionan a temperaturas bajas, es decir a 60 °C y a 80 °C, sin embargo, cuando se acondicionan a temperaturas altas, a 150 °C y a 170 °C, se nota un cambio en la morfología del geotextil, donde las fibras presentan grietas y fracturas.

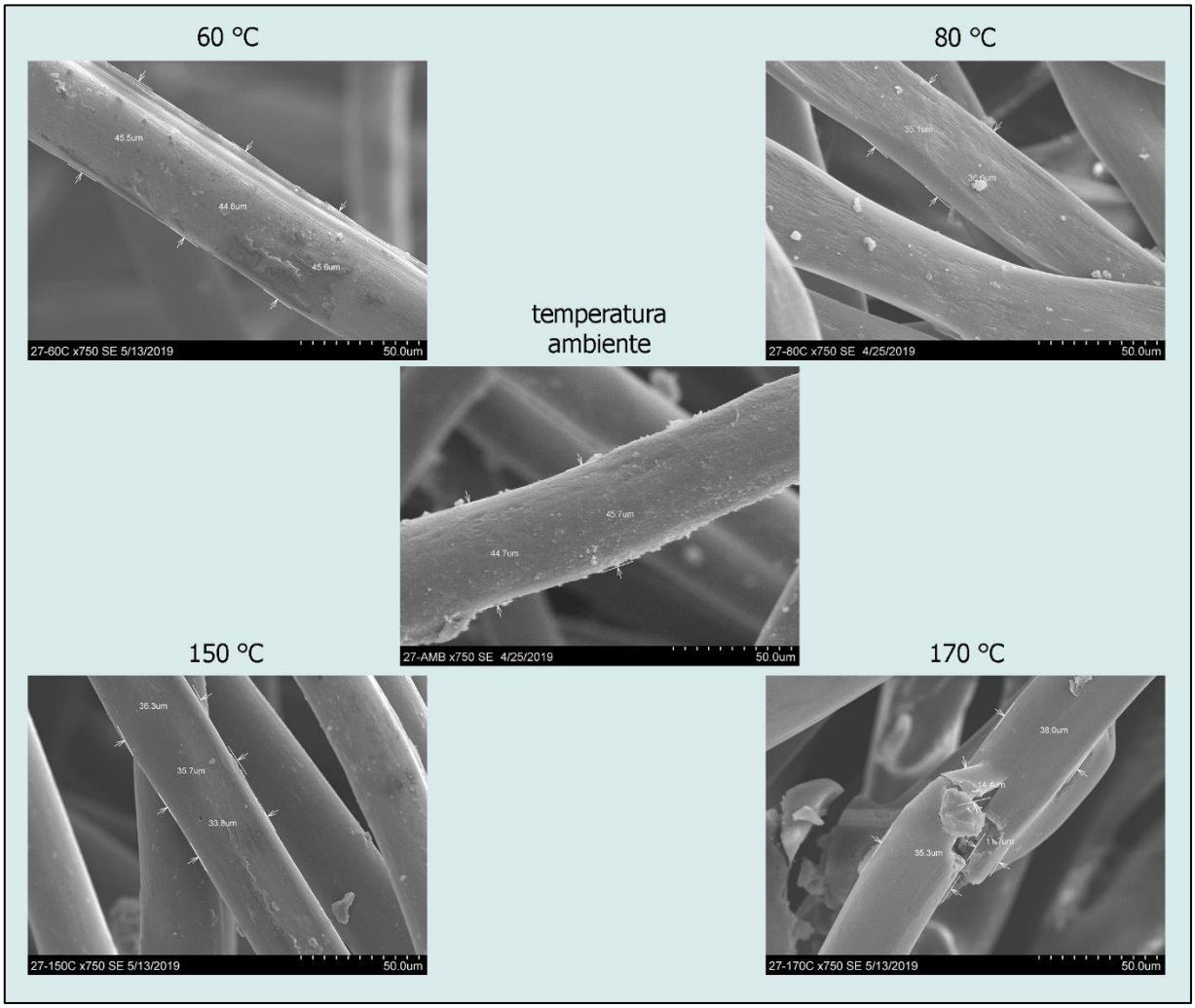



Figura 58. Micrografías de barrido electrónico a diferentes temperaturas para el geotextil MacTex® N 27.1 a una resolución x750

En la Figura 59 se muestran las micrografías de barrido electrónico del geotextil MacTex® N 40.1 a temperatura ambiente y a las diversas temperaturas a las que se acondicionó. De igual forma que el caso anterior, al comparar las fotografías, se observa que los filamentos de polipropileno no sufren cambios a temperaturas bajas (60 °C y a 80 °C), pero sí a temperaturas

altas (150 °C y 170 °C), donde se nota un cambio en la morfología del geotextil en la cual las fibras se unen entre sí, se rigidizan y producen grietas.

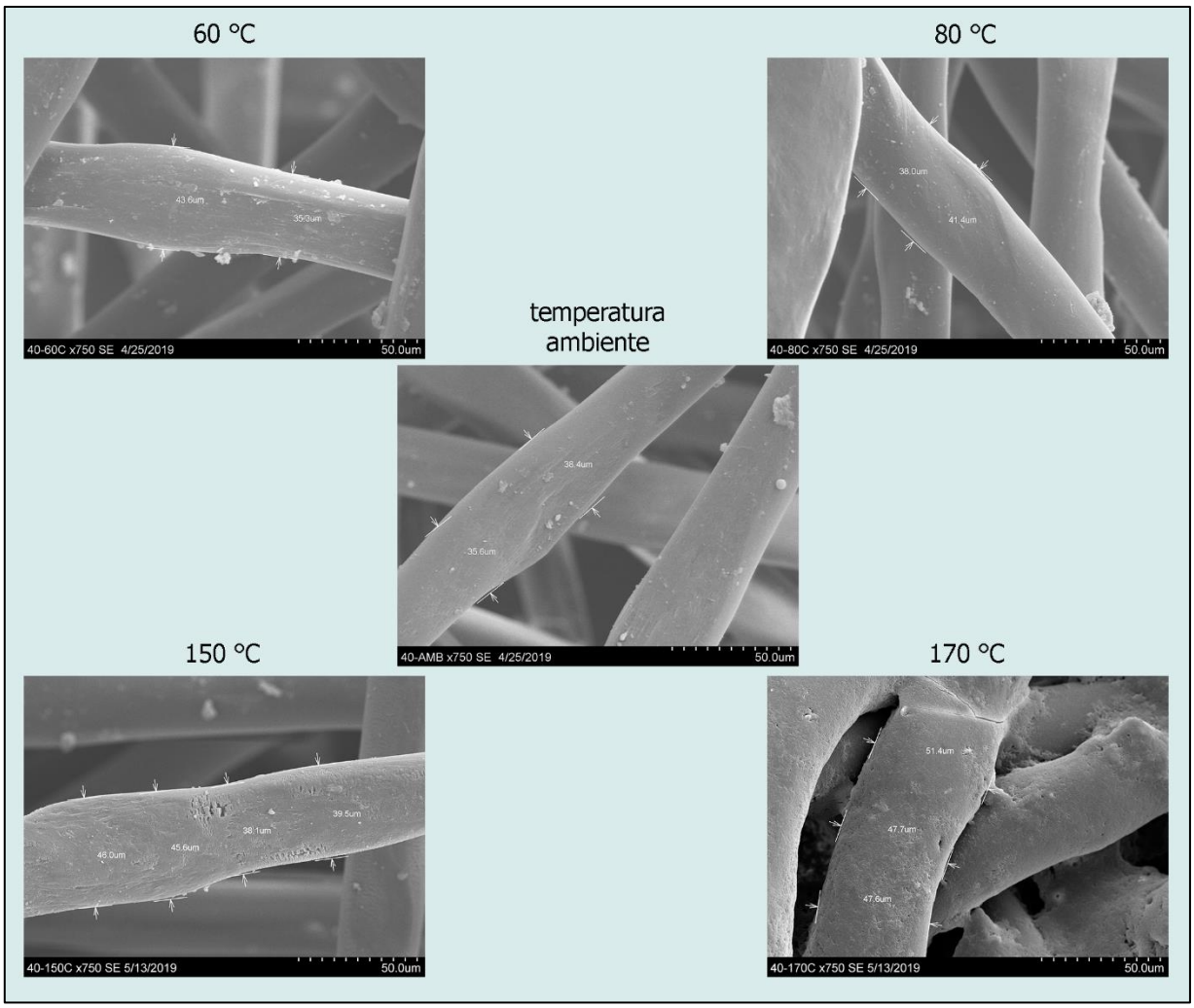



Figura 59. Micrografías de barrido electrónico a diferentes temperaturas para el geotextil MacTex® N 40.1 a una resolución x60

Si bien el polipropileno tiene una estructura semicristalina que le proporciona una alta rigidez, buenas propiedades a la tracción y resistencia a los ácidos, a los álcalis y a la mayoría de disolventes, se debe tener cuidado con la temperatura a la cual se expone, ya que a altas temperaturas se alteran sus propiedades físicas, lo cual puede representar una reducción en su resistencia mecánica, esto se comprueba con los demás ensayos realizados al geotextil.

En la Figura 60 se muestra una comparación de la morfología obtenida del geotextil MacTex® N 27.1 y del geotextil MacTex® N 40.1 a una temperatura de 150 °C, donde en apariencia se

observa que el geotextil de mayor gramaje sufre mayor alteración térmica, ya que sus fibras se funden y se unen entre sí y presenta grietas más profundas, lo cual indica desgaste del material.

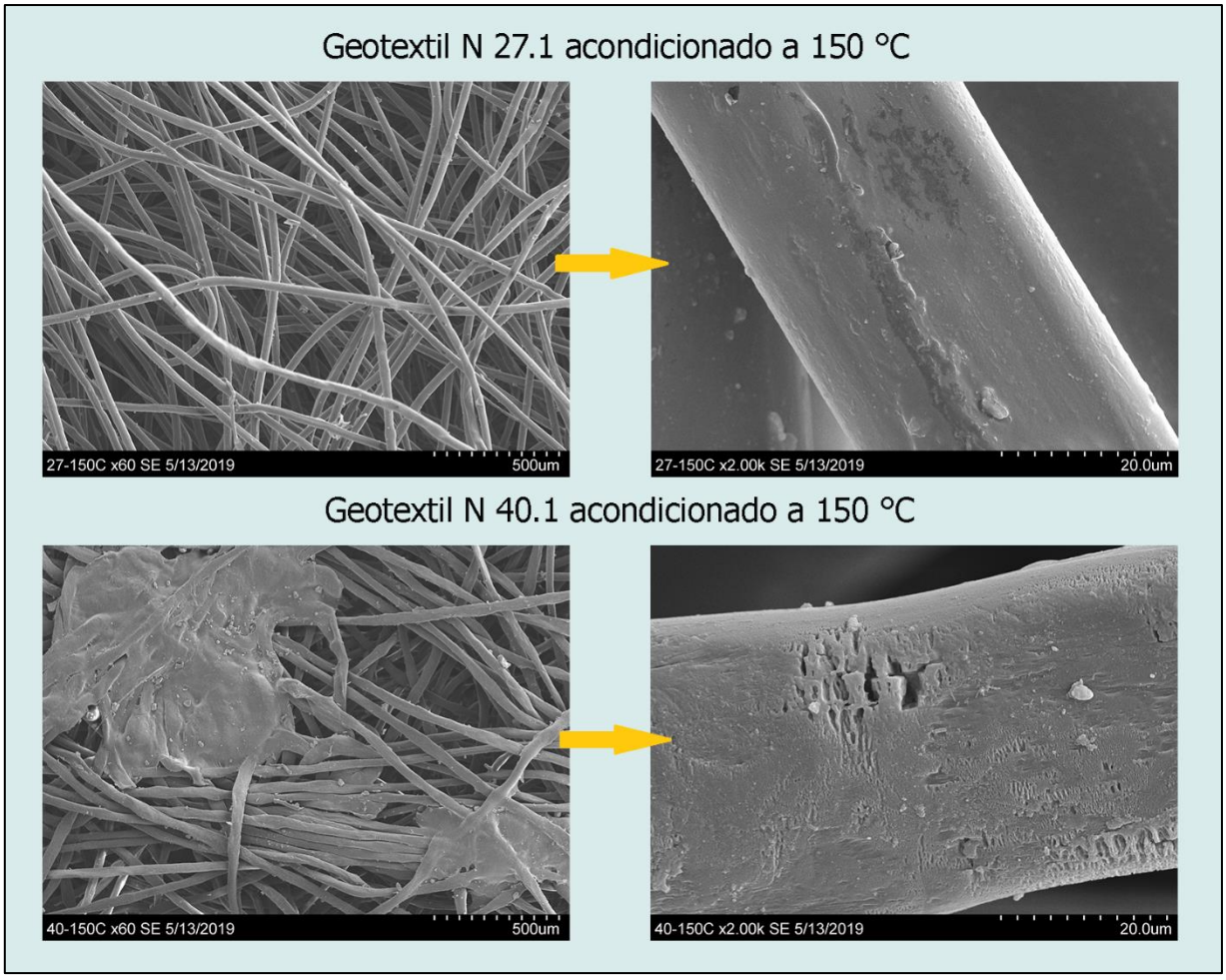



Figura 60. Comparación según gramaje de micrografías de barrido electrónico para los geotextiles acondicionados a 150 °C

En la Figura 61 se muestra una comparación de la morfología obtenida del geotextil MacTex® N 27.1 y del geotextil MacTex® N 40.1 a una temperatura de 170 °C. Del mismo modo que el caso anterior, se observa que el geotextil de mayor gramaje sufre mayor alteración térmica, ya que sus fibras están más unidas entre sí y presenta grietas no solo en las fibras sino en toda la muestra.

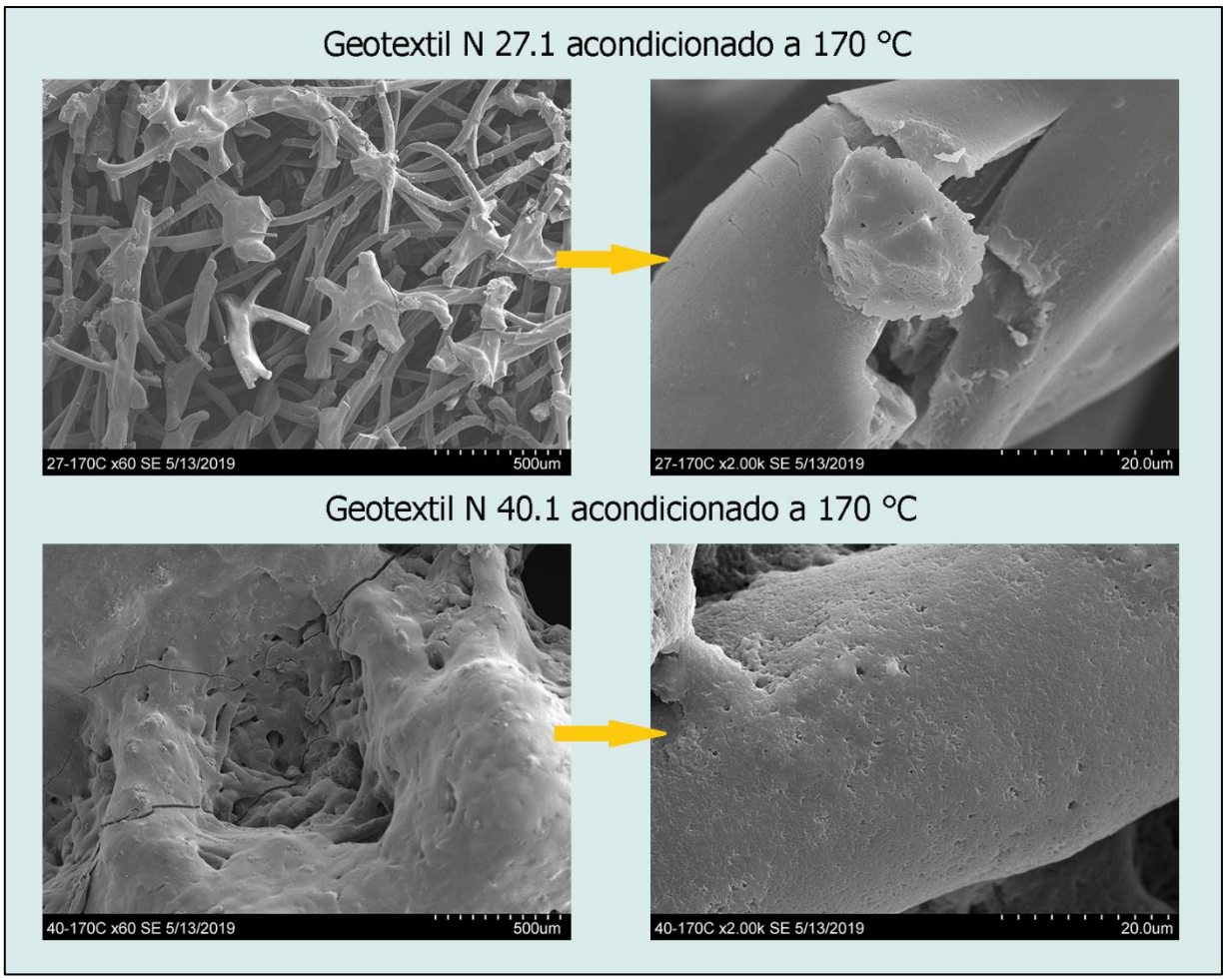



Figura 61. Comparación según gramaje de micrografías de barrido electrónico para los geotextiles acondicionados a 170 °C

### 3.2.2. Caracterización química

Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

Para realizar un adecuado análisis espectral de los resultados obtenidos para cada acondicionamiento térmico y tipo de geotextil se superpusieron los espectros a partir de un punto base, el cual corresponde a un número de onda de 2716 $cm^{-1}$. Por lo que todas las gráficas que se muestran en este apartado cumplen dicha condición.

En la Figura 62 se muestran los espectros obtenidos para tres muestras de geotextil no tejido de polipropileno de gramaje 140 $g/m^2$ a temperatura ambiente. Los datos se reportan como el porcentaje de transmitancia, el cual corresponde a la relación de la cantidad de luz transmitida y la cantidad de luz que percibe inicialmente en la muestra.

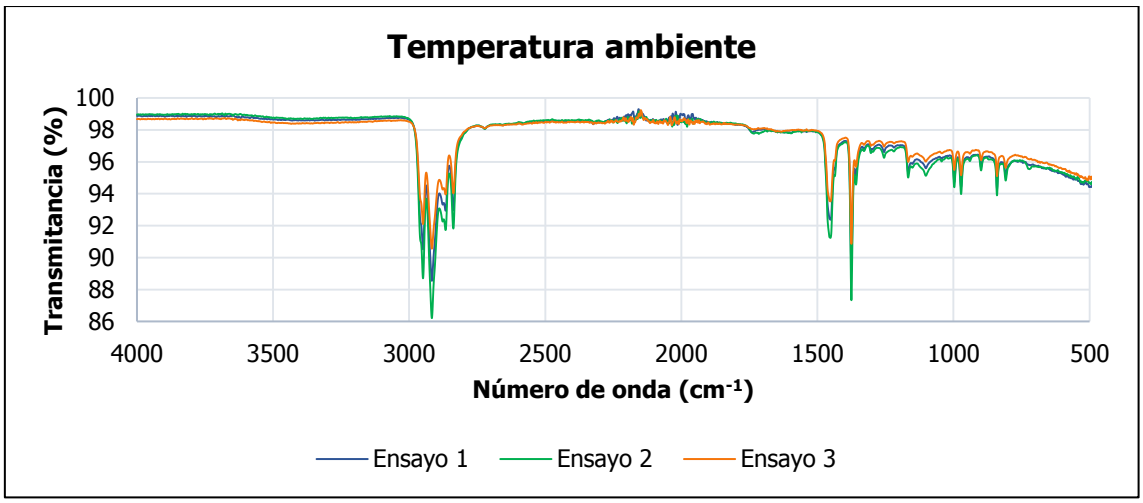



Figura 62. Espectros a temperatura ambiente del geotextil MacTex® N 27.1

Al comparar los espectros del ensayo 1, 2 y 3 de la Figura 62 se nota que no presentan un cambio significativo entre sí en cuanto a la forma del espectro según el número de onda, la diferencia radica en el porcentaje de transmitancia, lo que significa que en unos casos se escapó más el haz de luz que en otros. Esto se debe a que el geotextil es un material poroso, y si bien este se dobló en varias partes para que tuviera un grosor adecuado, su superficie no es uniforme por lo que dependiendo de la zona que entre en contacto con la punta de diamante así va a ser el resultado del porcentaje de transmitancia.

En la Figura 63 se muestran los espectros obtenidos para tres muestras de geotextil no tejido de polipropileno de gramaje 203 g/m$^2$ a temperatura ambiente.

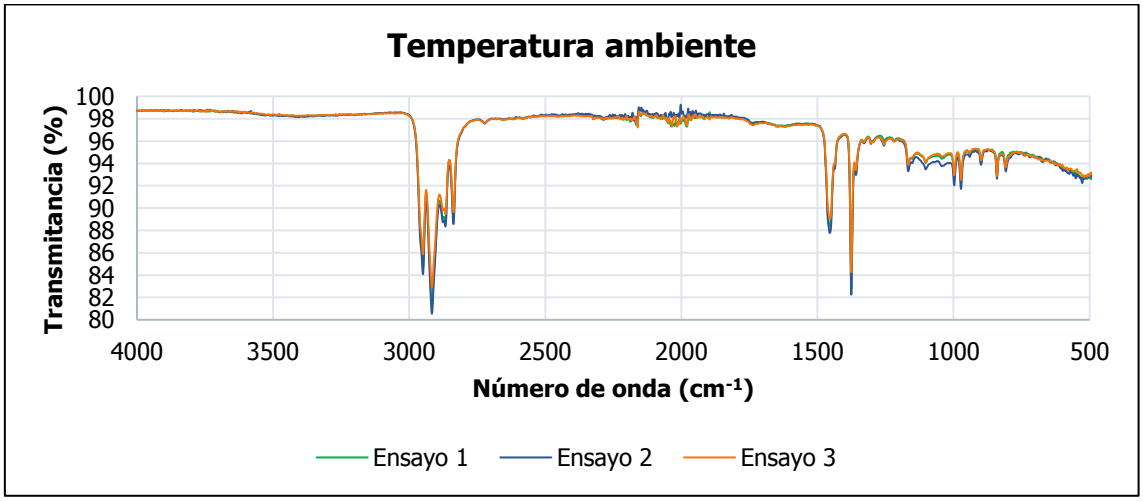



Figura 63. Espectros a temperatura ambiente del geotextil MacTex® N 40.1

Al comparar los espectros de la Figura 63 se presenta la misma diferencia que para el caso del geotextil de 140 g/m$^2$, el porcentaje de transmitancia varía dependiendo de la superficie que entre en contacto con la punta de diamante.

Se realizó una comparación de los espectros de las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 a temperatura ambiente. Para esto se eligieron los espectros con menor porcentaje de transmitancia para cada tipo de gramaje y se superpusieron, tal como se muestra en la Figura 64.

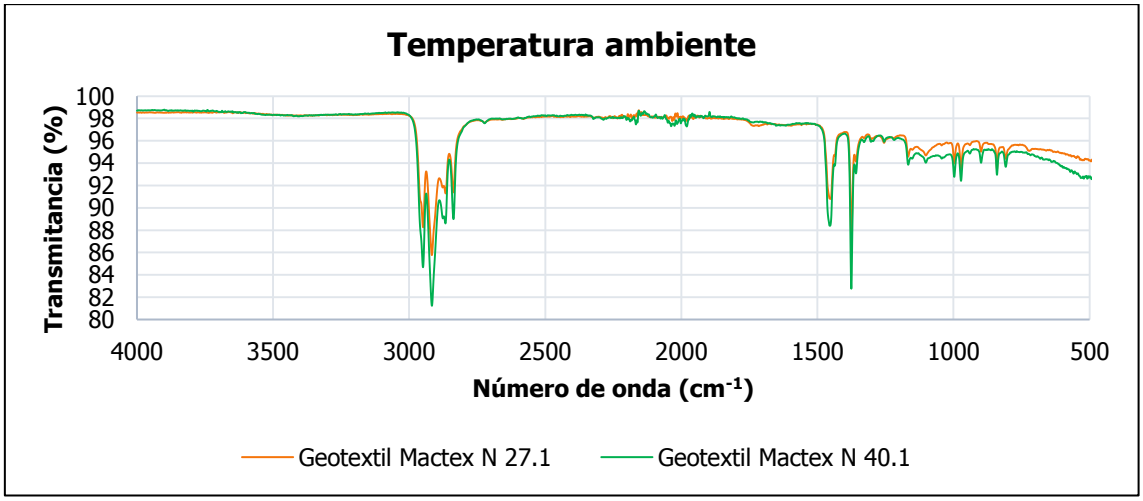



Figura 64. Comparación de espectros de la muestra de geotextil MacTex® N 27.1 y MacTex® N40.1 a temperatura ambiente

A partir de la Figura 64 se observa que no existen diferencias entre la forma de un espectro y otro, lo cual se debe a que con la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier se logra determinar la composición química del material, y al tratarse del mismo material (polipropileno) no se presenta distinto comportamiento químico vibracional. Además, la muestra es preparada doblándola en varias partes por lo que no es posible observar diferencias entre gramajes.

Al comparar los espectros obtenidos en el laboratorio a temperatura ambiente para cada gramaje con el Atlas de compuestos orgánicos (Schrader, 1989), tal como se muestra en la Figura 65, se comprueba que efectivamente el material corresponde a polipropileno, ya que la huella digital es la misma.

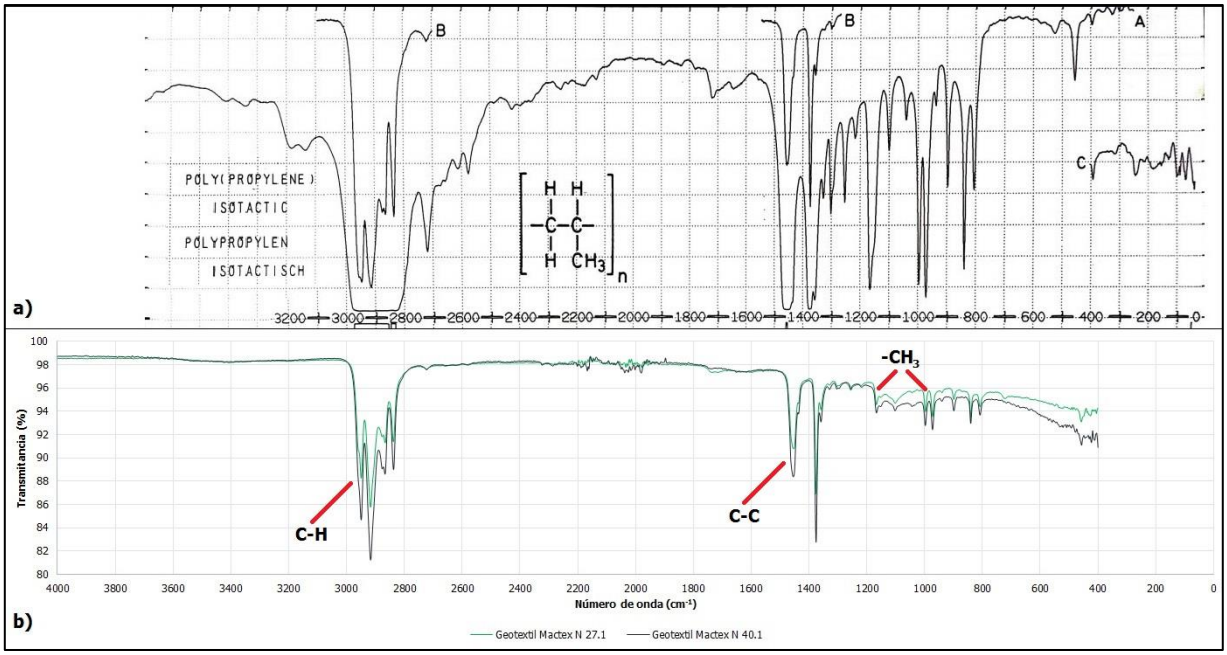



Figura 65. Comparación del espectro del Atlas de compuestos orgánicos (a) con el obtenido en el laboratorio (b)

Fuente: Schrader, 1989

Modificado por: Gómez, 2019

En el espectro de infrarrojo medio se producen las vibraciones fundamentales, es decir, entre 4000 $cm^{-1}$ y 200 $cm^{-1}$ es posible observar una serie de bandas, tal como se muestra en el espectro obtenido en el laboratorio de la Figura 65, donde se observan tres grupos de bandas correspondientes a movimientos de tensión de los enlaces C–H a 2900 $cm^{-1}$, movimientos de tensión C–C en (1350-1450) $cm^{-1}$ y movimientos de flexión de $–CH_3$ entre (1200-1000) $cm^{-1}$. El polipropileno es una fibra formada por macromoléculas lineales de hidrocarburos alifáticos saturados, en los que un carbono de cada dos lleva una ramificación metilo en disposición isostática y sin otra sustitución.

En la Figura 66, la Figura 67, la Figura 68 y la Figura 69 se muestran los espectros del geotextil no tejido de polipropileno N 27.1 acondicionado a las temperaturas de 60 °C, 80 °C, 150 °C y 170 °C respectivamente. Para cada condición se muestran tres espectros superpuestos según el punto base 2716 $cm^{-1}$.

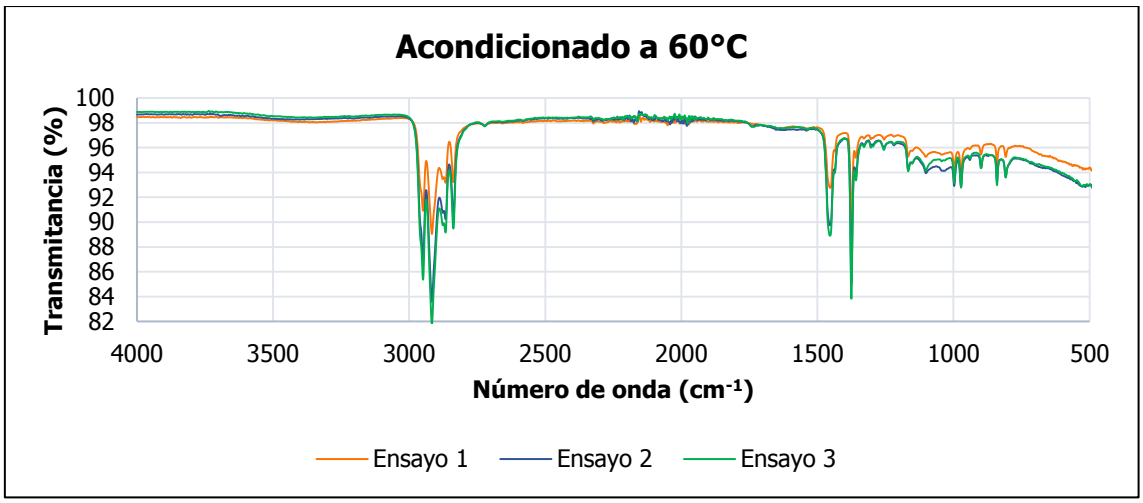



Figura 66. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 60 °C

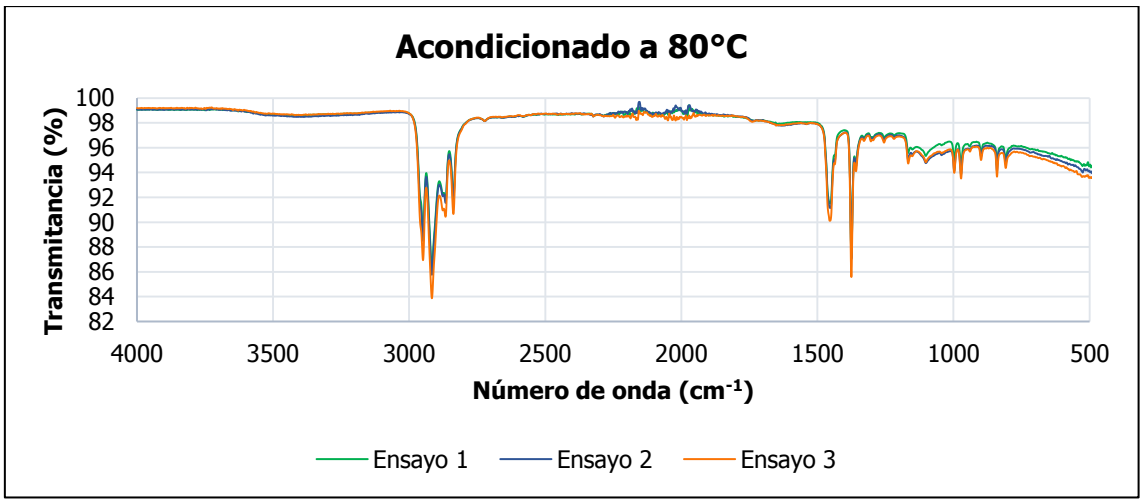



Figura 67. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 80 °C

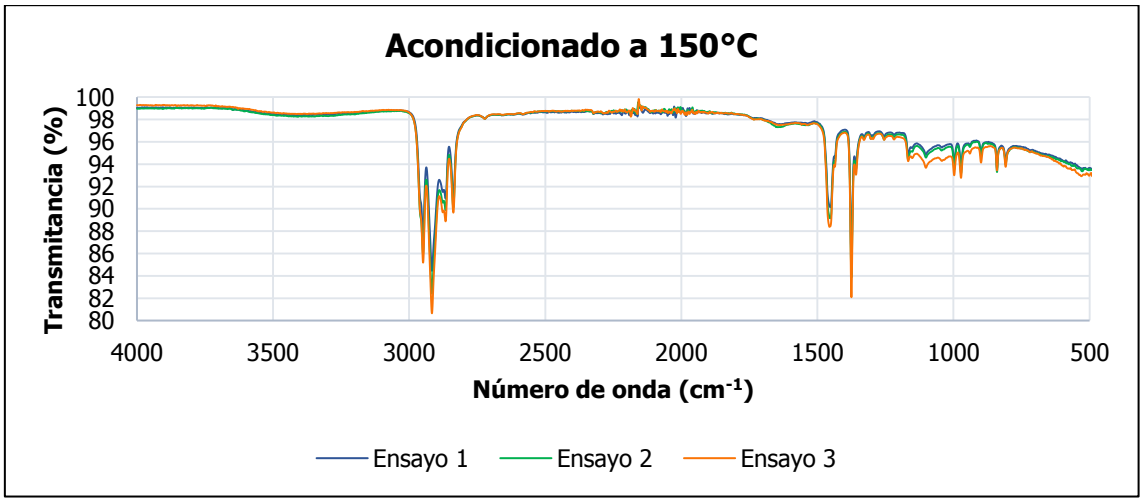



Figura 68. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 150 °C

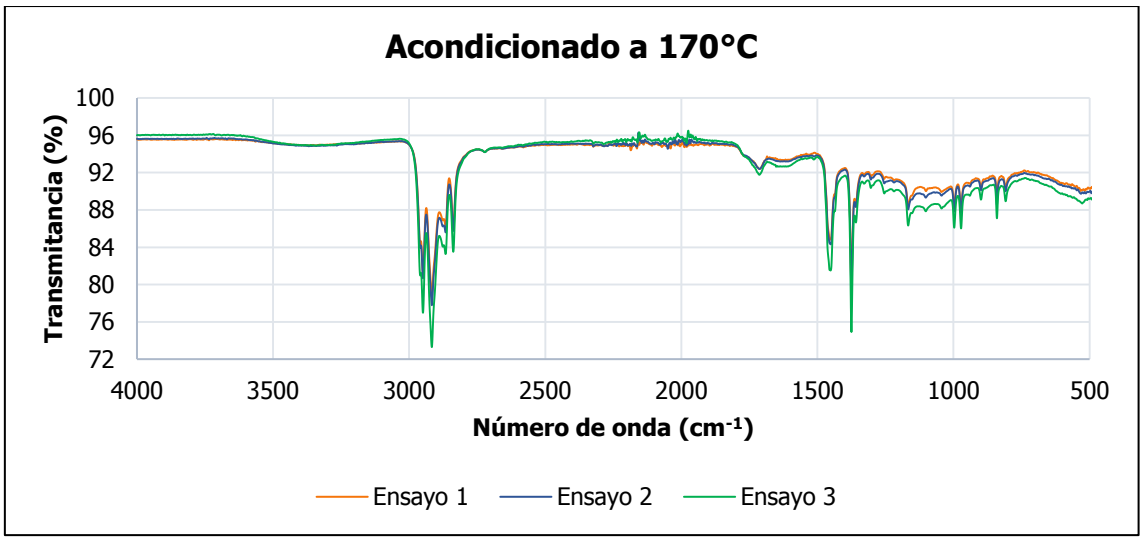



Figura 69. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 acondicionado a 170 °C

En la Figura 70 se presenta una comparación de los espectros obtenidos para el geotextil de gramaje 140 g/m$^2$ a temperatura ambiente y a temperaturas bajas (60 °C y 80 °C). Para cada temperatura se eligió el espectro con menor porcentaje de transmitancia y se superpusieron las tres condiciones.

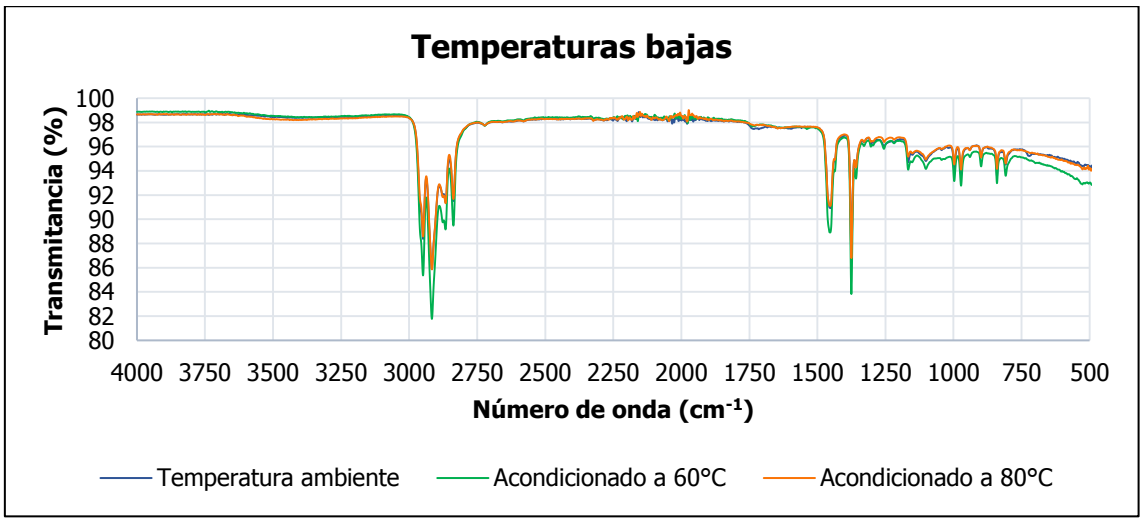



Figura 70. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 a temperaturas bajas

Al comparar los espectros del geotextil a temperatura ambiente, acondicionado a 60 °C y acondicionado a 80 °C de la Figura 70 no se presentan diferencias notables entre sí en cuanto a la forma del espectro según el número de onda. Para la temperatura de 60 °C se observa un menor porcentaje de transmitancia en comparación con los demás, sin embargo, como ya se ha explicado esto significa menor escape del haz de luz que en los otros casos.

En la Figura 71 se presenta una comparación de los espectros obtenidos para el geotextil de gramaje 140 g/m$^2$ a temperatura ambiente y a temperaturas altas (150 °C y 170 °C). Del mismo modo, para cada temperatura se eligió el espectro con menor porcentaje de transmitancia y se superpusieron las tres condiciones.

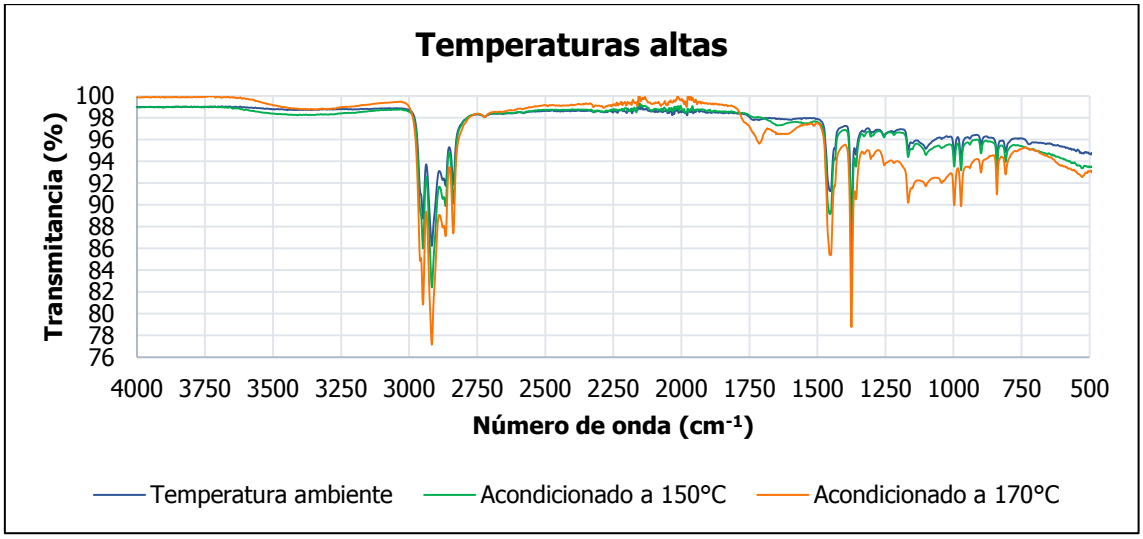



Figura 71. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 27.1 a temperaturas altas

Al comparar los resultados de la Figura 71 se notan diferencias en la forma de los espectros de las muestras de geotextil acondicionadas a temperaturas altas y el espectro del geotextil a temperatura ambiente. Entre 3600 cm$^{-1}$ y 3200 cm$^{-1}$ se observa un cambio en la curva del espectro, lo cual puede estar asociado a humedad absorbida por el material al meterse al horno y dejarse enfriar, ya que la estructura química del polipropileno no presenta grupos O-H y la curvatura formada no es tan pronunciada. Entre 1800 cm$^{-1}$ y 1500 cm$^{-1}$ se observan nuevas bandas las cuales están asociadas a un proceso de oxidación. En general, el espectro del geotextil acondicionado a una temperatura de 170 °C presenta menor porcentaje de transmitancia que las otras condiciones de temperatura, lo cual se atribuye a una reducción en su tamaño, al someterlo a una temperatura alta (tal como se muestra en la Figura 73), donde el material se vuelve menos poroso y evita que el haz de luz del infrarrojo se escape.

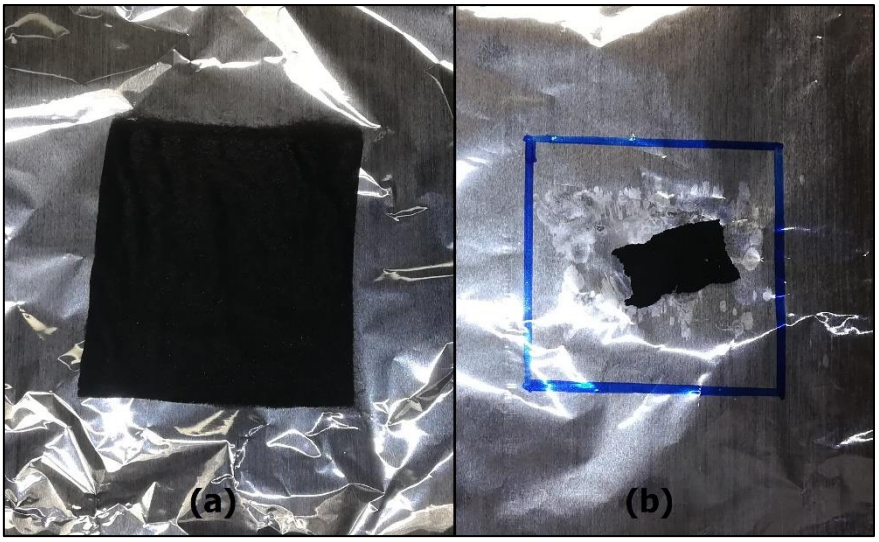



Figura 72. Geotextil MacTex® N 27.1 antes del acondicionamiento térmico (a) y después del acondicionamiento a 170 °C (b)

En la Figura 73, la Figura 74, la Figura 75 y la Figura 76 se muestran los espectros del geotextil no tejido de polipropileno N 40.1 acondicionado a las temperaturas de 60 °C, 80 °C, 150 °C y 170 °C respectivamente. De igual forma, para cada condición se muestran tres espectros superpuestos según el punto base 2716 $cm^{-1}$.

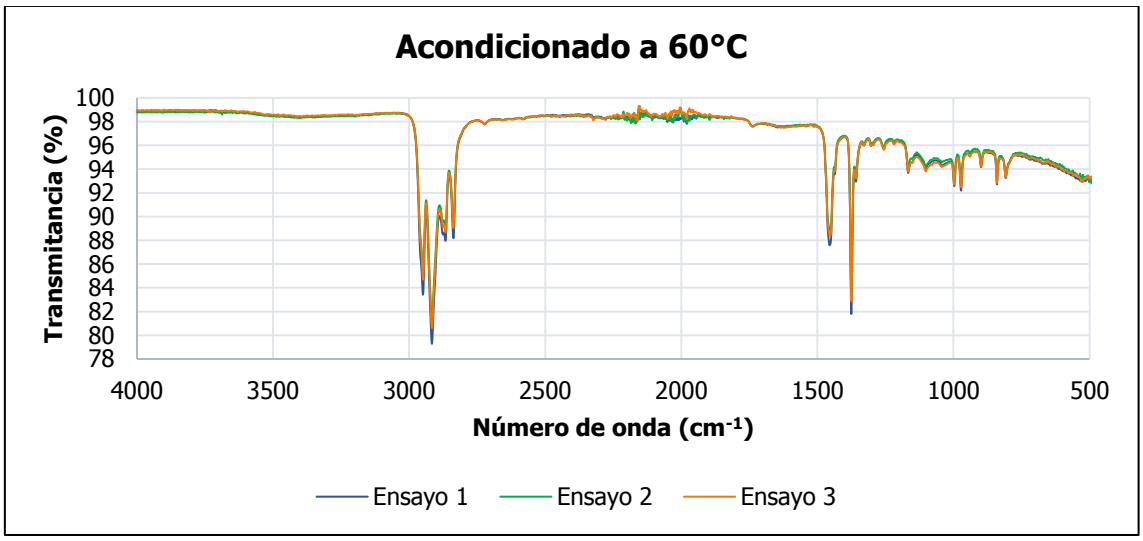



Figura 73. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 60 °C

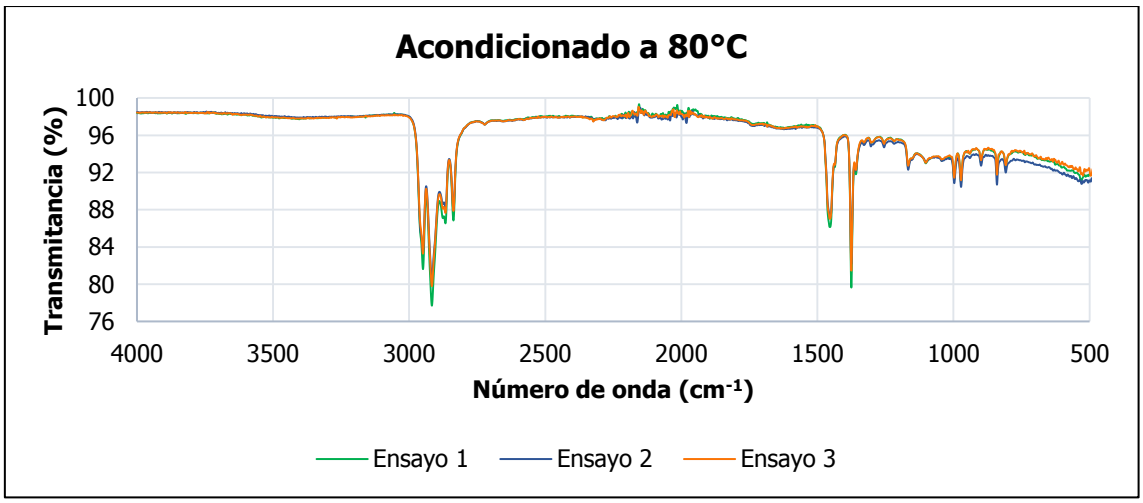



Figura 74. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 80 °C

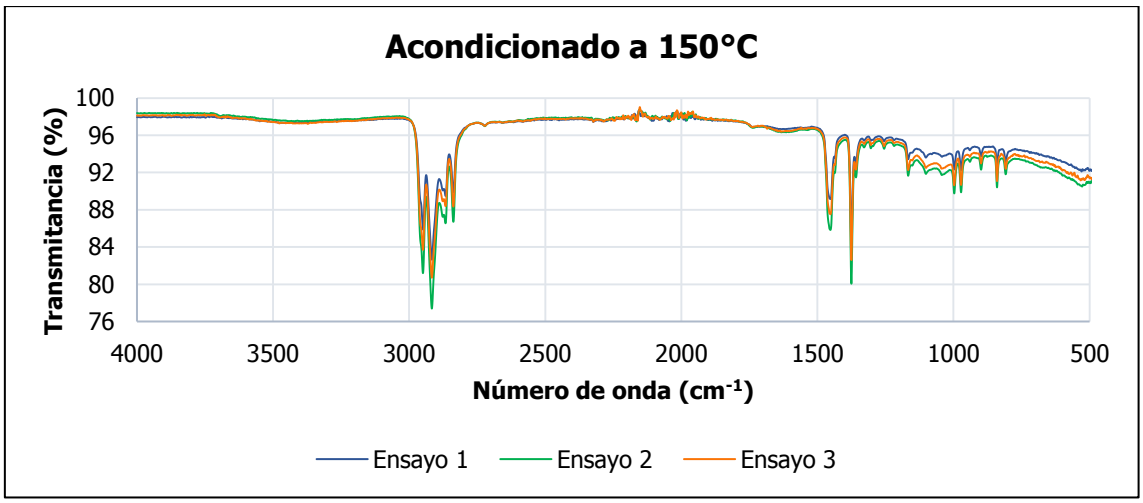



Figura 75. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 150 °C

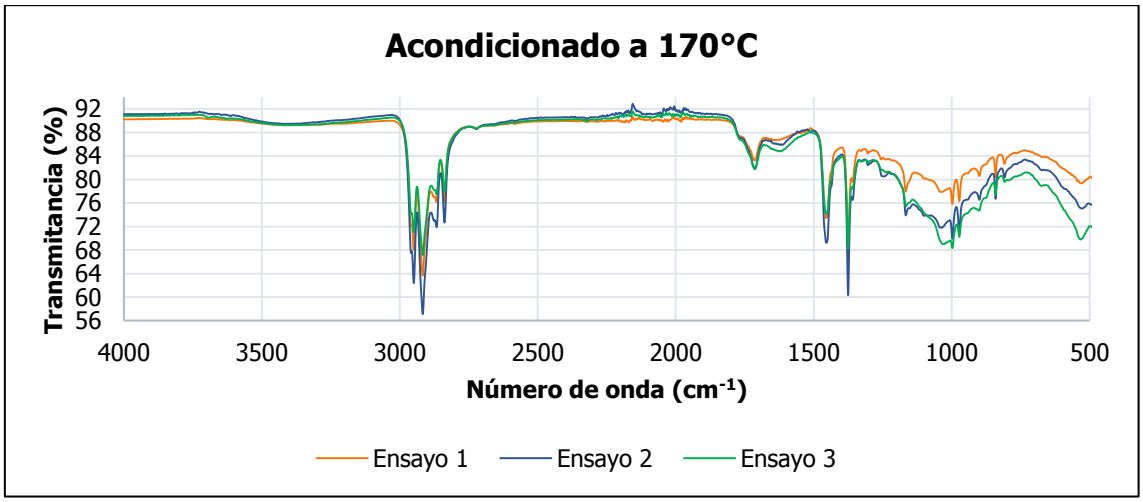



Figura 76. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 acondicionado a 170 °C

En la Figura 77 se presenta una comparación de los espectros obtenidos para el geotextil de gramaje 203 g/m$^2$ a temperatura ambiente y a temperaturas bajas (60 °C y 80 °C). Para cada temperatura se eligió el espectro con menor porcentaje de transmitancia y se superpusieron las tres condiciones.

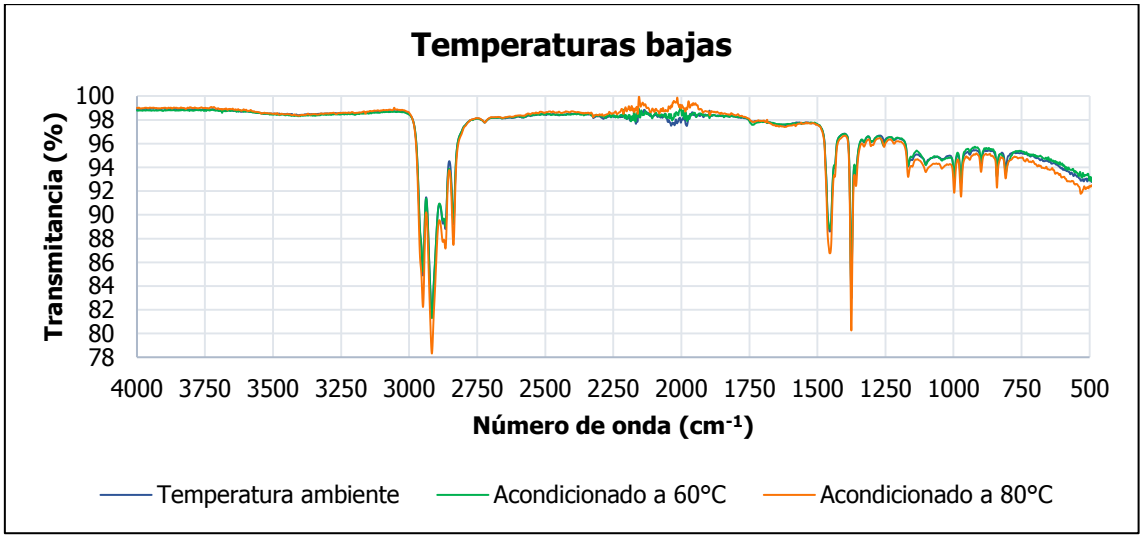



Figura 77. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 a temperaturas bajas

Del mismo modo que para el caso del geotextil de gramaje 140 g/m$^2$ presentado en la Figura 70, al comparar los espectros de la Figura 77 no se observan diferencias notables entre sí en cuanto a la forma del espectro según el número de onda. Para la temperatura de 80 °C se observa un menor porcentaje de transmitancia en algunos puntos en comparación con los demás espectros lo que significa menor escape del haz de luz que en los otros casos.

En la Figura 78 se presenta una comparación de los espectros obtenidos para el geotextil de gramaje 203 g/m$^2$ a temperatura ambiente y a temperaturas altas (150 °C y 170 °C). Del mismo modo, para cada temperatura se eligió el espectro con menor porcentaje de transmitancia y se superpusieron las tres condiciones.

Al comparar los resultados de la Figura 78 se notan diferencias en la forma de los espectros de las muestras de geotextil acondicionadas a temperaturas altas y el espectro del geotextil a temperatura ambiente. Para el caso del geotextil acondicionado a 170 °C se presentan diferencias más marcadas. Entre 3600 cm$^{-1}$ y 3200 cm$^{-1}$ se observa un cambio en la curva del espectro, lo cual puede estar asociado a humedad absorbida por el material al meterse al horno y dejarse enfriar, ya que la estructura química del polipropileno no presenta grupos O-H y la

curvatura formada no es tan pronunciada. Entre 1800 $cm^{-1}$ y 1500 $cm^{-1}$ se observan nuevas bandas las cuales están asociadas al proceso de oxidación explicado anteriormente. Además, a partir de 1300 $cm^{-1}$ el porcentaje de transmitancia baja y la forma del espectro cambia, el pico más bajo de esta nueva zona del espectro se da a 997 $cm^{-1}$, este fenómeno se atribuye a la absorción reversible de olefina, la cual se da en los polímeros en condiciones críticas de temperatura y forma un doble enlace de carbono como se muestra en la Figura 79, la cual corresponde a la estructura molecular del propileno.

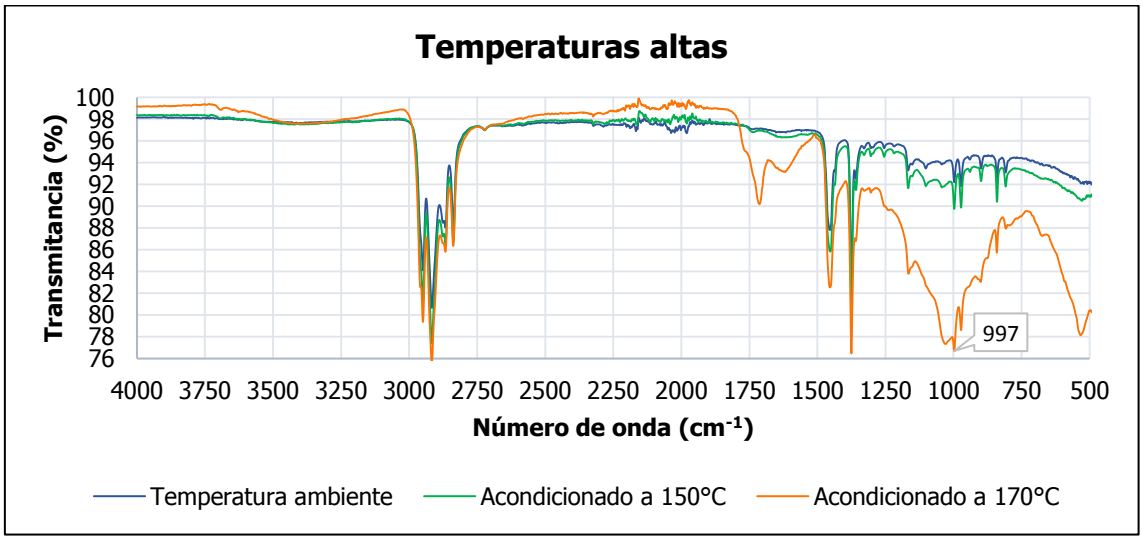



Figura 78. Comparación de espectros del geotextil MacTex® N 40.1 a temperaturas altas

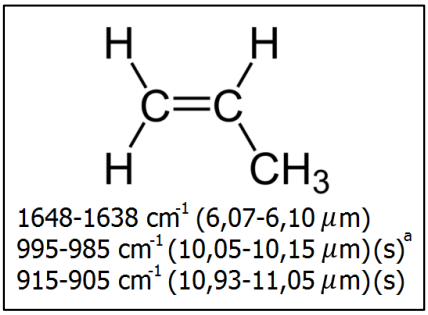



Figura 79. Estructura molecular del propileno

Fuente: Silverstein, Bassler y Morrill, 1981

Modificado por: Gómez, 2019

En la Figura 80 se muestra la comparación de los espectros de los dos gramajes de geotextil trabajados en este proyecto (140 $g/m^2$ y 203 $g/m^2$), estos acondicionados a 170 °C. En esta figura se observa un comportamiento similar del espectro para ambos gramajes, sin embargo, el espectro del geotextil de mayor gramaje presenta picos mayores en las zonas donde se

presenta oxidación, esto se da debido a que el geotextil MacTex® N 40.1 presenta mayor porcentaje de polipropileno, por lo que existe una alteración térmica mayor.

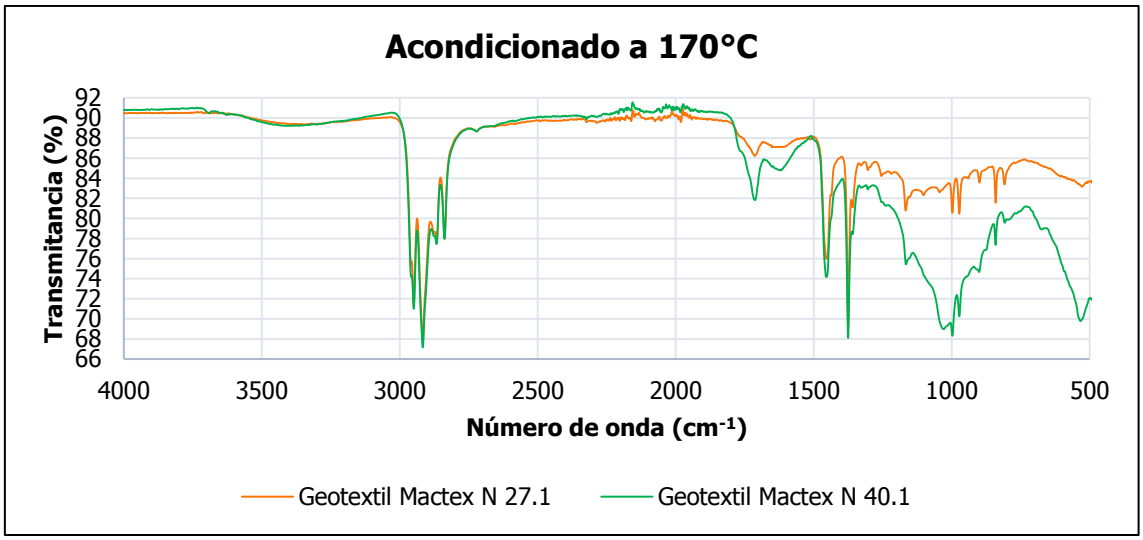



Figura 80. Comparación de espectros de las muestras de geotextil MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 acondicionadas a 170 °C

Análisis Termogravimétrico (TGA)

En la Figura 81, la Figura 82 y la Figura 83 se muestran las curvas TGA obtenidas para el geotextil no tejido de polipropileno de gramaje 140 g/m$^2$, los datos se reportan como el porcentaje de masa en función de la temperatura. Además, para realizar un adecuado análisis termogravimétrico, a cada termograma se le graficó la derivada del porcentaje de masa en función del tiempo, con lo cual es sencillo establecer los puntos de inflexión de las curvas donde ocurren eventos térmicos.

La Figura 81 muestra el termograma del primer espécimen evaluado del geotextil de gramaje 140 g/m$^2$. Con la derivada del porcentaje de masa con respecto al tiempo se logran definir tres puntos de inflexión: 227,93 °C, 398,58 °C y 480,19 °C. Desde 50 °C (temperatura a la que se inició el ensayo) a la temperatura de transición de 227,93 °C se produce una primera pérdida, como esta ocurre cerca de los 100 °C, se atribuye a un cambio en el porcentaje de masa debido a la humedad. De 227,93 °C a 480,19 °C se da una segunda pérdida del porcentaje de masa, la cual resulta de la descomposición térmica de la muestra. En el caso de la pérdida 1 el porcentaje de cambio de masa obtenido es bajo 0,5172 %, mientras que para la pérdida 2 se

pierde un porcentaje considerable de 98,65 % donde la mayor pérdida se da en el pico de la derivada a 398,58 °C.

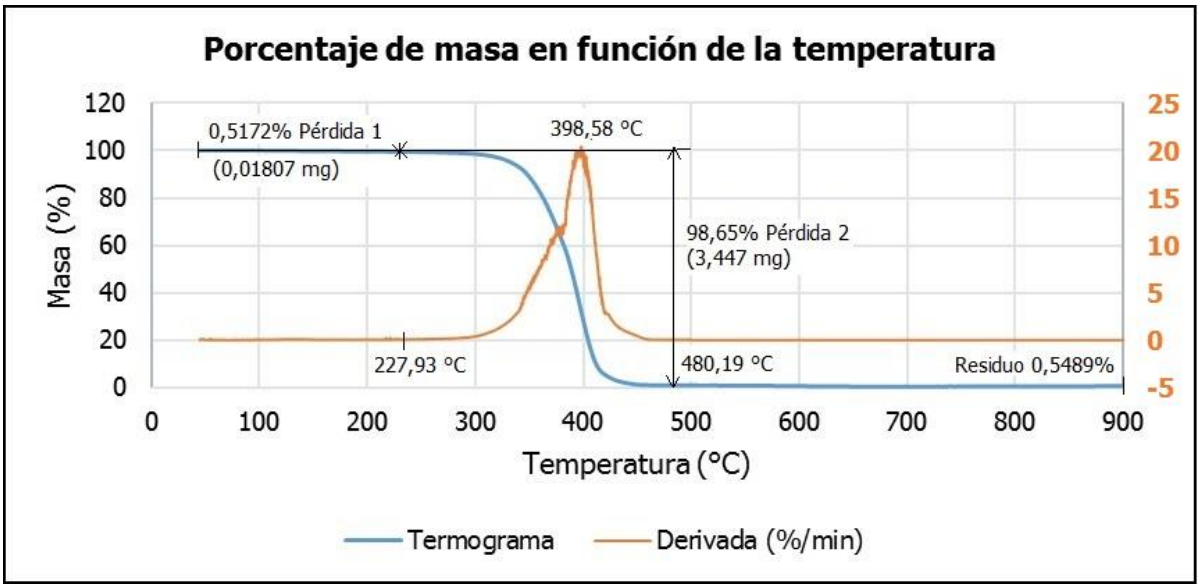



Figura 81. Termograma de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 27.1

El someter la muestra a altas temperaturas da lugar a un aumento en el movimiento molecular, atómico o iónico, produciendo cambios en su estructura. De acuerdo con la Figura 15, el termograma obtenido para el geotextil no tejido de polipropileno representa la descomposición del espécimen con formación de productos de reacción de volátiles en un proceso simple, cuya curva puede ser utilizada para definir los límites de estabilidad de la muestra. La pequeña pérdida inicial se atribuye a la humedad y la segunda pérdida se asigna a la descomposición térmica del material.

De acuerdo con la derivada del porcentaje de masa con respecto al tiempo de la Figura 82 se definen los siguientes puntos de inflexión: 223,95 °C, 370,27 °C y 456,14 °C. La pérdida 1 ocurre desde 50 °C (temperatura a la que se inició el ensayo) a la temperatura de transición de 223,95 °C, que de igual forma, se atribuye a un cambio en el porcentaje de masa debido a la humedad. De 223,95 °C a 456,14 °C se da una segunda pérdida del porcentaje de masa debido a la descomposición térmica de la muestra. La pérdida 1 presenta un cambio de masa de 0,2470 % el cual es bajo en comparación con la pérdida 2 en la cual se da un 98,89 % de cambio de masa con la mayor pérdida en el pico de la derivada a 370,27 °C.

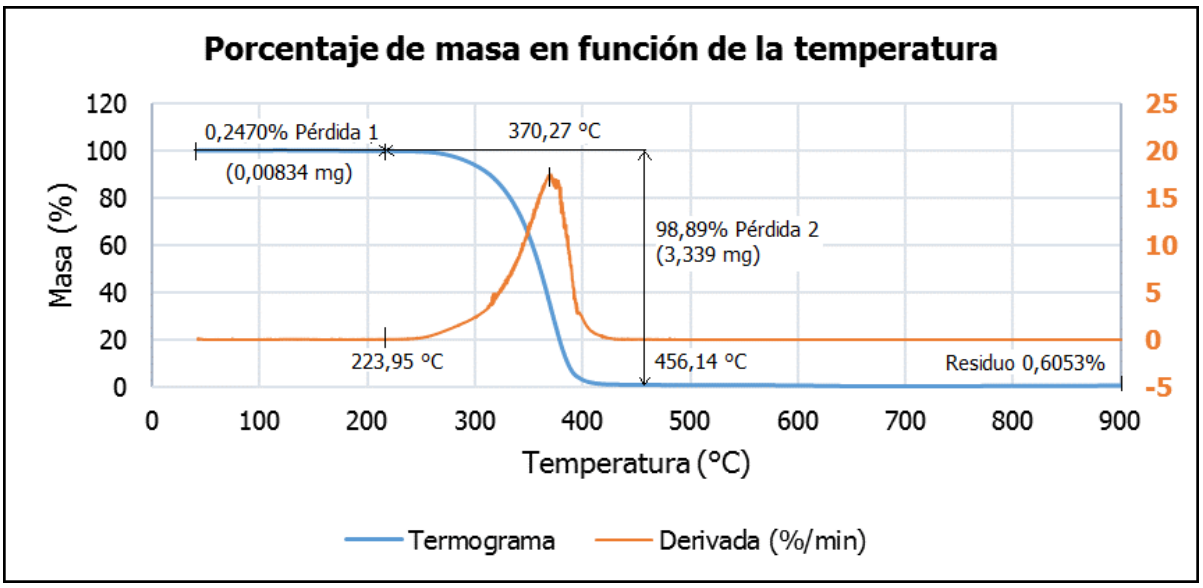



Figura 82. Termograma de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 27.1

Para la tercera muestra ensayada de geotextil de gramaje 140 g/m$^2$, mostrada en la Figura 83, se definen los siguientes puntos de inflexión: 227,10 °C, 392,79 °C y 458,69 °C. La pérdida 1 ocurre desde el inicio del ensayo, 50 °C, a la primera temperatura de transición, 227,10 °C. El primer cambio en el porcentaje de masa de 0,3029 % ocurre debido a la humedad y es significativamente menor al de la segunda pérdida, la cual se da desde 227,10 °C hasta 458,69 °C con un valor de 96,59 %, asociada con la descomposición térmica del material. La mayor pérdida ocurre en el pico de la derivada a 392,79 °C.

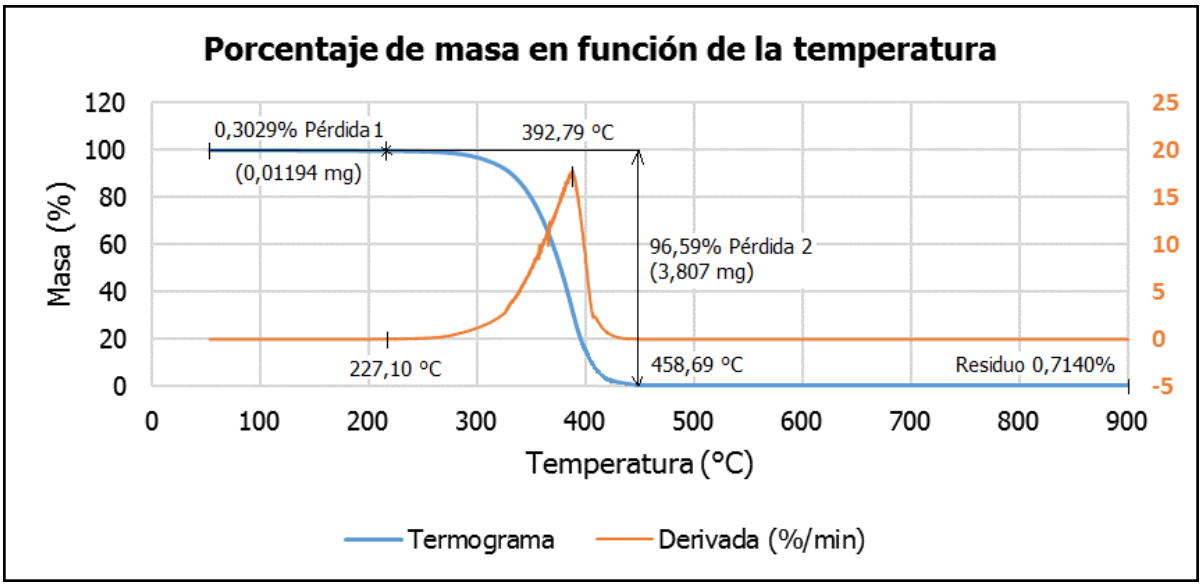



Figura 83. Termograma de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 27.1

Para el caso del geotextil de 203 g/m$^2$ se realizó el mismo tratamiento anterior, obteniendo los termogramas de la Figura 84, la Figura 85 y la Figura 86, con sus respectivas derivadas del porcentaje de masa con respecto al tiempo.

En la Figura 84 se muestra el termograma de la primera muestra evaluada del geotextil de gramaje 203 g/m$^2$. Con la derivada del porcentaje de masa con respecto al tiempo se definen los siguientes tres puntos de inflexión: 253,48 °C, 387,33 °C y 445,66 °C. Desde 50 °C a la temperatura de transición de 253,48 °C se produce una primera pérdida del porcentaje de masa debida a la humedad la cual corresponde a 0,5829 %. De 227,93 °C a 445,66 °C se da una segunda pérdida del porcentaje de masa resultado de la descomposición térmica del material, que corresponde a 92,88 %. La primera pérdida es baja en comparación con la segunda, donde la mayor pérdida se da en el pico de la derivada a 387,33 °C.

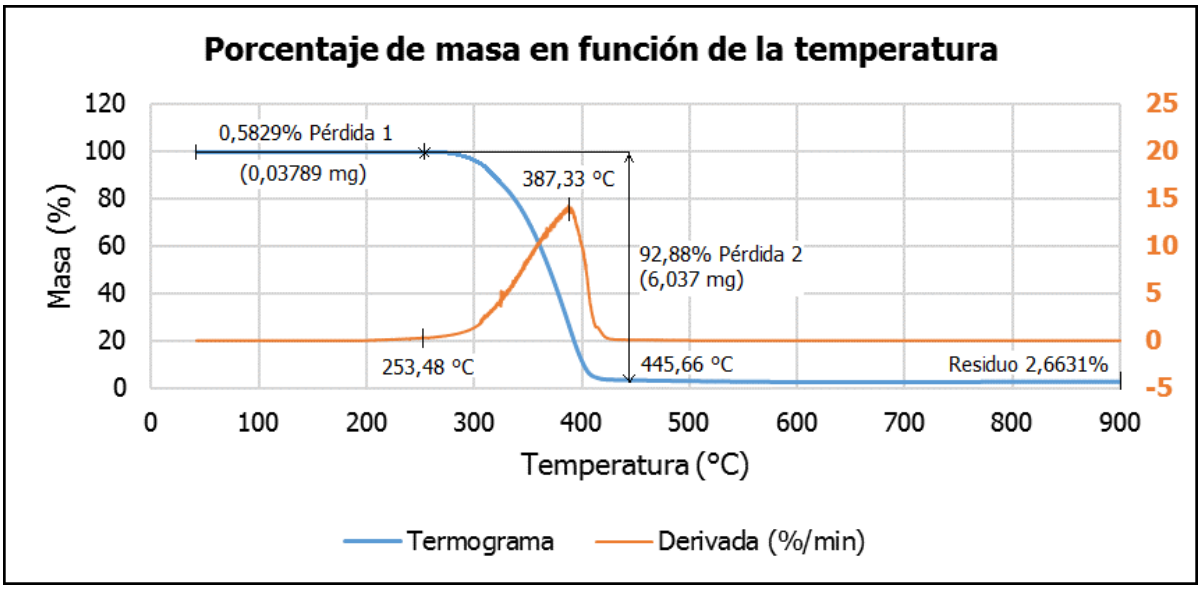



Figura 84. Termograma de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 40.1

En la Figura 85 se muestra el termograma de la segunda muestra evaluada del geotextil de gramaje 203 g/m$^2$. Con la derivada del porcentaje de masa con respecto al tiempo se definen los siguientes tres puntos de inflexión: 251,31 °C, 409,51 °C y 478,57 °C. Desde 50 °C a la temperatura de transición de 251,31 °C se produce una primera pérdida del porcentaje de masa debida a la humedad la cual corresponde a 0,5748 %. De 251,31 °C a 478,57 °C se da una segunda pérdida del porcentaje de masa resultado de la descomposición térmica del material, que corresponde a 94,05 %, donde la mayor pérdida se da en el pico de la derivada a 409,51 °C.

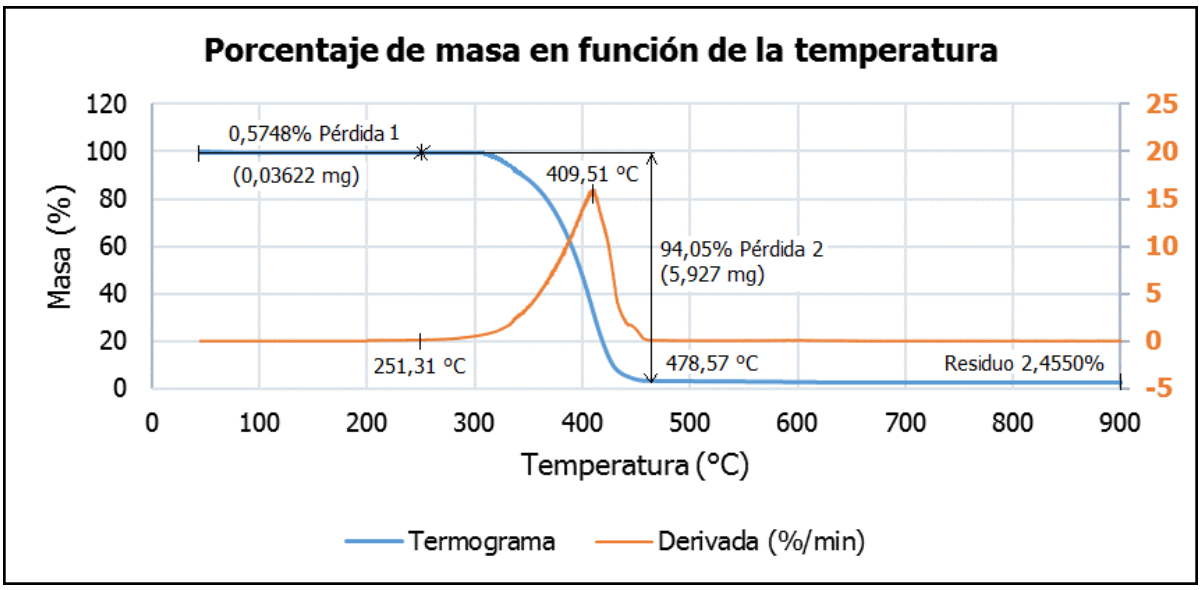



Figura 85. Termograma de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 40.1

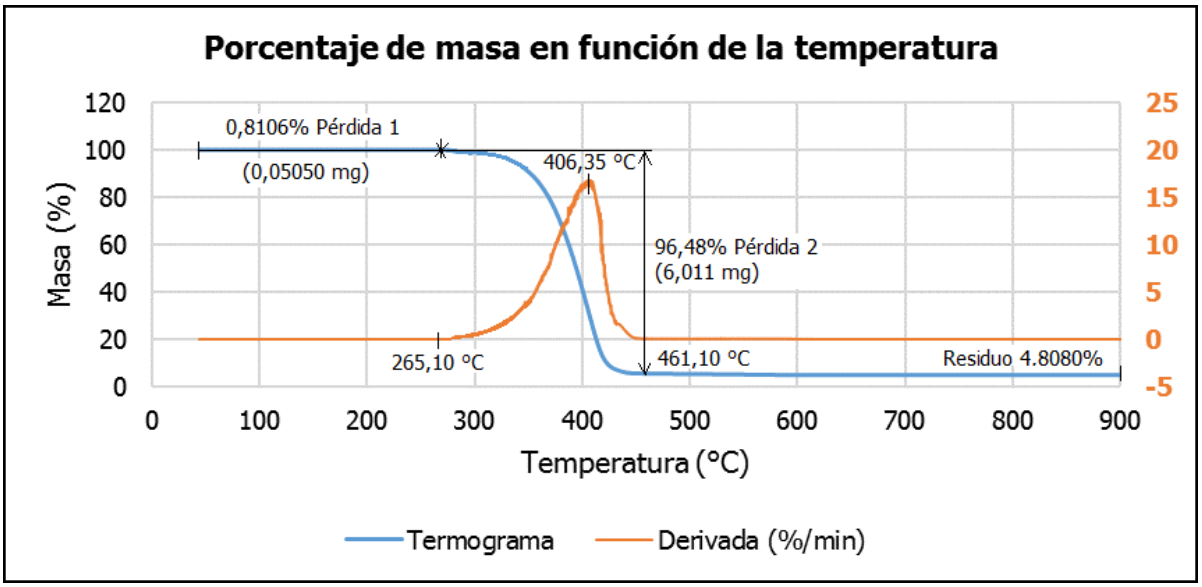



Figura 86. Termograma de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 40.1

En la Figura 86 se muestra el termograma de la tercera muestra evaluada del geotextil de gramaje 203 g/m$^2$. De acuerdo con la derivada del porcentaje de masa con respecto al tiempo se definen los siguientes tres puntos de inflexión: 265,10 °C, 406,35 °C y 461,10 °C. Desde 50 °C a la temperatura de transición de 265,10 °C se produce una primera pérdida del porcentaje de masa debida a la humedad la cual corresponde a 0,8106 %. De 265,10 °C a 461,10 °C se da una segunda pérdida del porcentaje de masa resultado de la descomposición térmica del

material, que corresponde a 96,48 %, donde la mayor pérdida se da en el pico de la derivada a 406,35 °C.

Tal como lo indica la norma ASTM E1131, para el material sólido se tomaron varias muestras de diferentes áreas y se ejecutaron varios ensayos por separado, por lo que en el Cuadro 12 se muestra el promedio de los resultados para su debido análisis. En este se observa que, si bien el material sufre una pérdida inicial, esta es poco significativa, para el caso del geotextil MacTex® N 27.1 de gramaje 140 g/m$^2$ es de 0,36 % en promedio y para el caso geotextil MacTex® N 40.1 de gramaje 203 g/m$^2$ es de 0,66 %. Sin embargo, la segunda pérdida representa una descomposición casi por completo del material 98,04 % para el geotextil de menor gramaje y 94,47 % para el de mayor gramaje. Además, a una temperatura de 900 °C queda un residuo de 0,62 % para el geotextil MacTex® N 27.1 y 3,31 % para el geotextil MacTex® N 40.1 en promedio. Cabe resaltar que el geotextil de menor gramaje pierde mayor masa en su proceso de descomposición en comparación con el de mayor gramaje, lo cual se debe a que tiene menos densidad, esto se verifica al observar los resultados de residuo, donde el geotextil de mayor gramaje presenta mayor porcentaje de residuo.

Cuadro 12. Promedio de los resultados de porcentaje de pérdida de masa para las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1

| **Geotextil** | **Muestra** | **Pérdida 1** | | **Pérdida 2** | | **Residuo** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **%** | **mg** | **%** | **mg** | **%** | **mg** |
| **MacTex® N 27.1** | 1 | 0,5172 | 0,01807 | 98,65 | 3,447 | 0,5489 | 0,0192 |
| | 2 | 0,2470 | 0,00834 | 98,89 | 3,339 | 0,6053 | 0,0204 |
| | 3 | 0,3029 | 0,01194 | 96,59 | 3,807 | 0,7140 | 0,0258 |
| **Promedio** | **-** | **0,3557** | **0,01278** | **98,04** | **3,5309** | **0,6227** | **0,0218** |
| **MacTex® N 40.1** | 1 | 0,5829 | 0,03789 | 92,88 | 6,037 | 2,6631 | 0,1731 |
| | 2 | 0,5748 | 0,03622 | 94,05 | 5,927 | 2,4550 | 0,1547 |
| | 3 | 0,8106 | 0,05050 | 96,48 | 6,011 | 4,8080 | 0,2995 |
| **Promedio** | **-** | **0,6561** | **0,04154** | **94,47** | **5,9917** | **3,3087** | **0,2091** |

Es importante prestar atención a los puntos donde inicia la pérdida debido a la descomposición, ya que en este punto la estructura molecular del geotextil varía y puede perder capacidad en su comportamiento mecánico. De acuerdo a los promedios de la primera temperatura de transición que se muestran en el Cuadro 13 se puede decir que para el caso del geotextil MacTex® N 27.1 de gramaje 140 g/m$^2$ la descomposición térmica inicia a 226,33 °C y para el

geotextil MacTex® N 40.1 de gramaje 203 g/m$^2$ la descomposición térmica inicia en 256,63 °C, aproximadamente. Con esto se puede concluir que el polímero no sufre descomposición durante el proceso de colocación de sobrecapas asfálticas, ya que estas se colocan a una temperatura máxima de 165 °C, la cual está por debajo de estos resultados. Es importante destacar que el geotextil de mayor gramaje soporta mayores temperaturas antes de descomponerse.

Cuadro 13. Promedio de las temperaturas de transición para las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1

| Geotextil | Muestra | Masa (mg) | Temperatura de puntos de inflexión (°C) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **MacTex® N 27.1** | 1 | 3,4940 | 227,93 | 398,58 | 480,19 |
| | 2 | 3,3770 | 223,95 | 370,27 | 456,14 |
| | 3 | 3,6166 | 227,10 | 392,79 | 458,69 |
| **Promedio** | **-** | **-** | **226,33** | **387,21** | **465,01** |
| **MacTex® N 40.1** | 1 | 6,5000 | 253,48 | 387,33 | 445,66 |
| | 2 | 6,3020 | 251,31 | 409,51 | 478,57 |
| | 3 | 6,2300 | 265,10 | 406,35 | 461,10 |
| **Promedio** | **-** | **-** | **256,63** | **401,06** | **461,78** |

Con el fin de realizar una comparación gráfica de los dos tipos de geotextiles utilizados, se elige la muestra 2 del geotextil MacTex® N 27.1 (Figura 82) y la muestra 2 del geotextil MacTex® N 40.1 (Figura 85), con las cuales se obtiene la Figura 87.

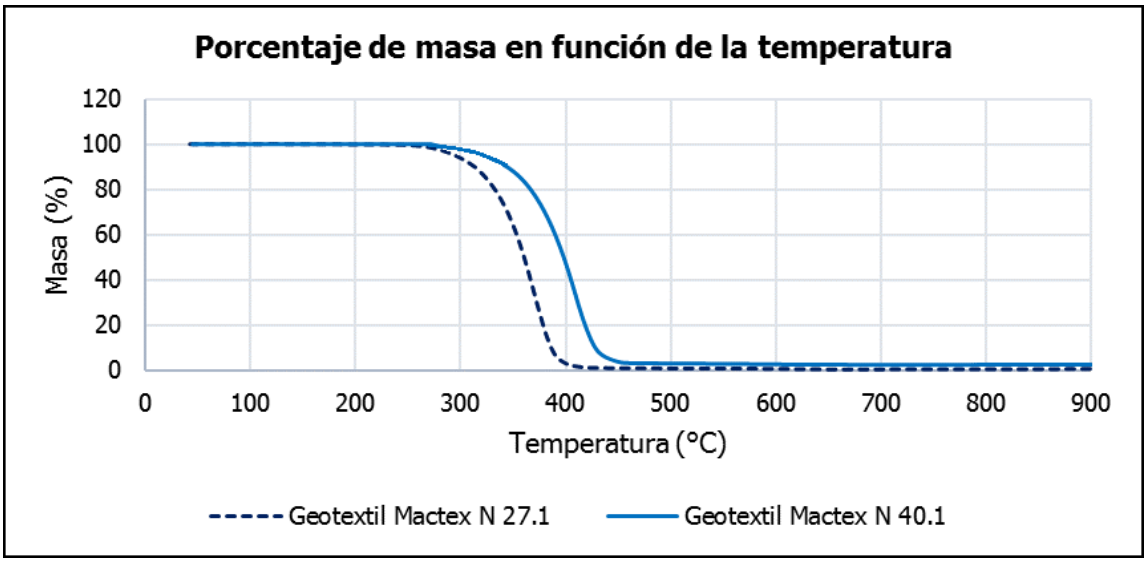



Figura 87. Comparación de termogramas de las muestras de geotextil no tejido MacTex® N 27.1 y MacTex® N40.1

En la Figura 87 se puede observar que el termograma del geotextil de mayor gramaje (MacTex® N 40.1) se traslada hacia la derecha, lo cual evidencia que soporta más la temperatura en comparación con el de menor gramaje (MacTex® N 27.1) debido a su densidad, por lo tanto se degrada menos rápido, lo cual coincide con los promedios de temperatura obtenidos en el Cuadro 13.

Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)

En la Figura 88, la Figura 89 y la Figura 90 se muestran las curvas DSC obtenidas para el geotextil no tejido de polipropileno de gramaje 140 g/m$^2$. Los datos se reportan como el flujo de calor en función de la temperatura.

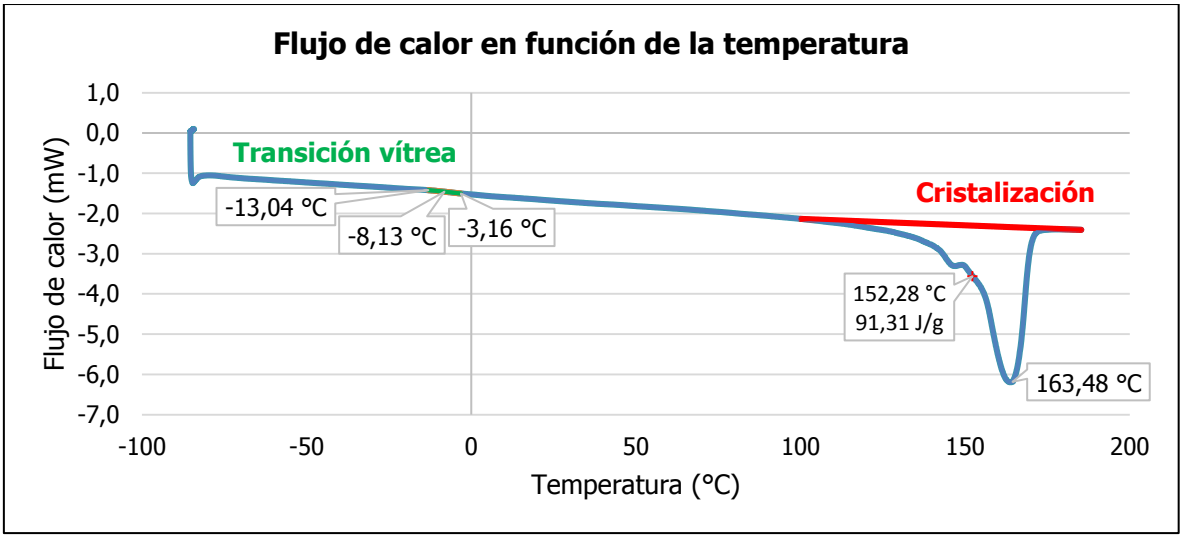



Figura 88. Curva DSC de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 27.1

En la Figura 88 se observa una transición vítrea desde -13,04 °C hasta -3,16 °C, donde el evento pico se da a una temperatura de -8,13 °C. La transición vítrea sucede a bajas temperaturas y corresponde a una transición física de segundo orden, esta es exclusiva de las regiones amorfas que pasan de estado vítreo a estado blando, es decir, el polipropileno pasa de comportarse como un material rígido a un material fácilmente deformable. En la misma figura se observa una transición térmica de cristalización a partir de 152,28 °C, donde su evento máximo se da a una temperatura de 163,48 °C, esta corresponde a una transición física de primer orden. La cristalización es el punto donde se alcanza suficiente energía para que se dé un arreglo cristalino del material. En la curva se puede observar una entalpía endotérmica ya que absorbe calor y requiere una energía de 91,31 J/g para que ocurra el proceso de

cristalización. El fenómeno descrito anteriormente coincide con el termograma típico de un polímero (en este caso polipropileno) descrito en la Figura 19.

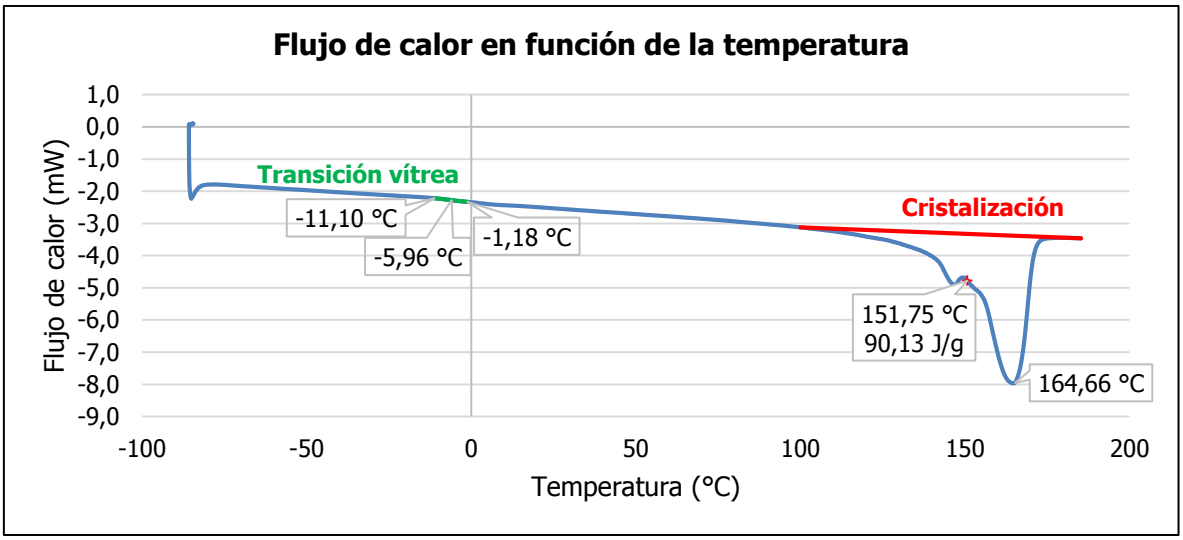



Figura 89. Curva DSC de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 27.1

En la Figura 89 se observa una transición vítrea desde -11,10 °C hasta -1,18 °C, donde el evento pico se da a una temperatura de -5,96 °C. La transición térmica de cristalización inicia a partir de 151,75 °C, donde su evento máximo se da a una temperatura de 164,66 °C, con una energía de 90,13 J/g.

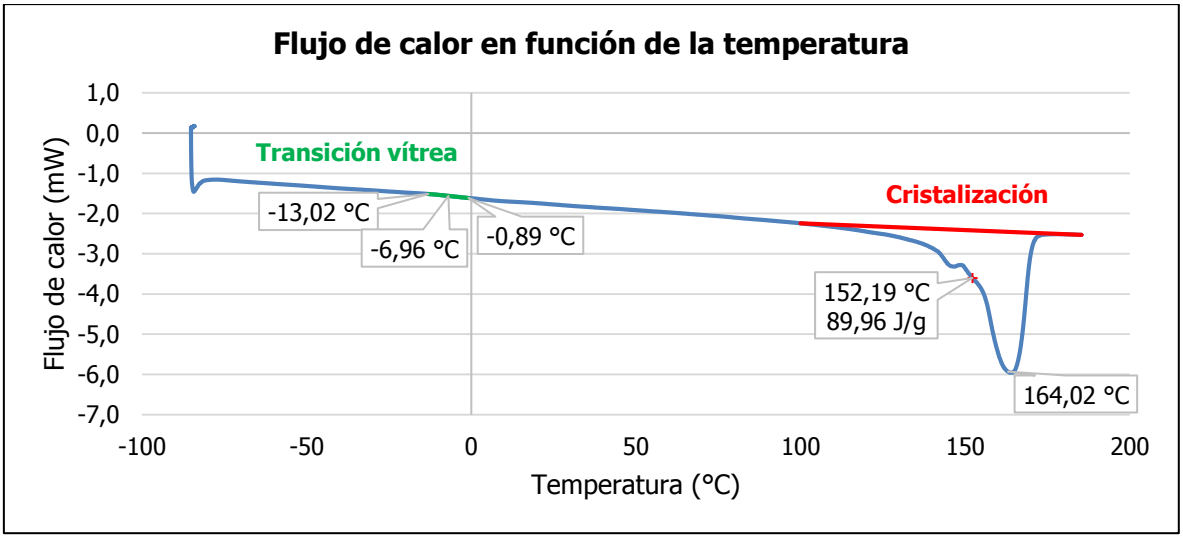



Figura 90. Curva DSC de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 27.1

En la Figura 90 se observa una transición vítrea desde -13,02 °C hasta -0,89 °C, donde el evento pico se da a una temperatura de -6,96 °C. La transición térmica de cristalización inicia

a partir de 152,19 °C, donde su evento máximo se da a una temperatura de 164,66 °C, con una energía de 89,96 J/g.

En la Figura 91, Figura 92 y Figura 93 se muestran las curvas DSC obtenidas para el geotextil no tejido de polipropileno de gramaje 203 g/m$^2$.

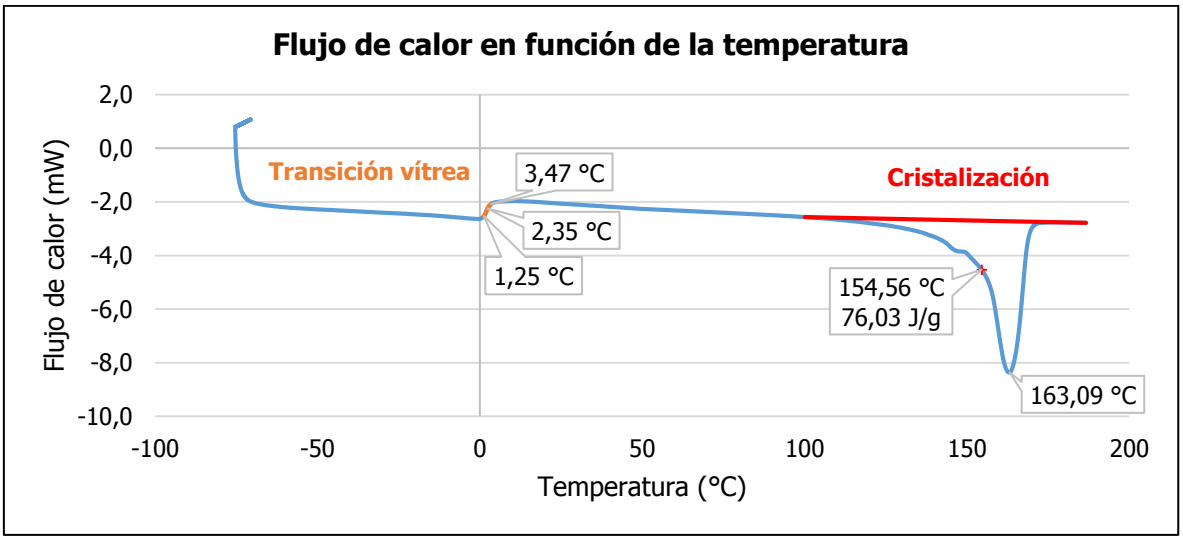



Figura 91. Curva DSC de la muestra 1 de geotextil MacTex® N 40.1

En la Figura 91 se observa una transición vítrea desde 1,25 °C hasta 3,47 °C, donde el evento pico se da a una temperatura de 2,35 °C. La transición térmica de cristalización inicia a partir de 154,56 °C, donde su evento máximo se da a una temperatura de 163,09 °C, con una energía de 76,03 J/g.

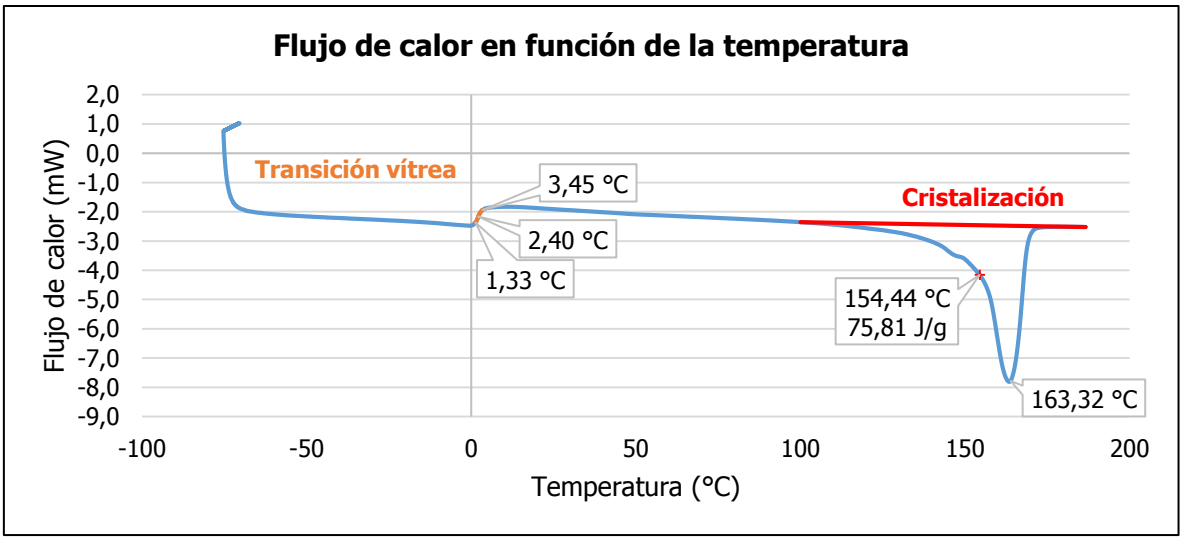



Figura 92. Curva DSC de la muestra 2 de geotextil MacTex® N 40.1

En la Figura 92 se observa una transición vítrea desde 1,33 °C hasta 3,45 °C, donde el evento pico se da a una temperatura de 2,40 °C. La transición térmica de cristalización inicia a partir de 154,44 °C, donde su evento máximo se da a una temperatura de 163,32 °C, con una energía de 75,81 J/g.

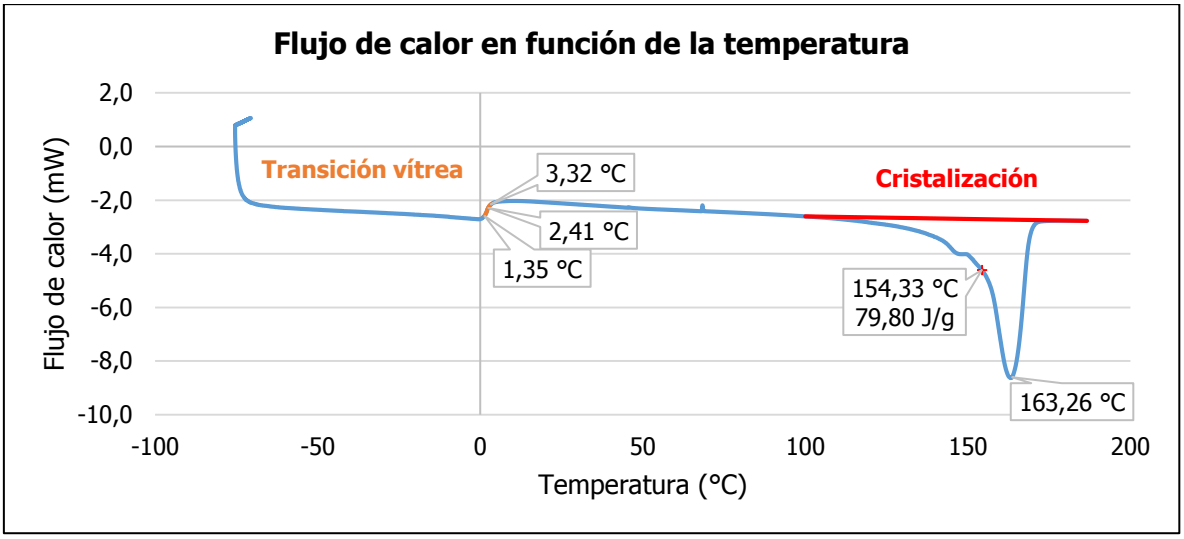



Figura 93. Curva DSC de la muestra 3 de geotextil MacTex® N 40.1

En la Figura 93 se observa una transición vítrea desde 1,35 °C hasta 3,32 °C, donde el evento pico se da a una temperatura de 2,41 °C. La transición térmica de cristalización inicia a partir de 154,33 °C, donde su evento máximo se da a una temperatura de 163,09 °C, con una energía de 79,80 J/g.

Se tomaron varias muestras de diferentes áreas del rollo de geotextil y se ejecutaron varios ensayos por separado, por lo que en el Cuadro 14 se muestra el promedio de los resultados para su debido análisis.

A través de las curvas DSC obtenidas y con la información del Cuadro 14 se determina que el geotextil MacTex® N 27.1 sufre una transición vítrea a partir de -12,39 °C y hasta -1,74 °C en promedio, por lo que no se recomienda utilizarlo a temperaturas menores de -1,74 °C ya que este se rigidiza. Además, a 152,07 °C, en promedio, se da una transición de cristalización, por lo que tampoco se recomienda utilizarlo a temperaturas mayores a esta, ya que el material se torna cristalino, quebradizo y pierde propiedades mecánicas de tensión. De forma similar, se determina que el geotextil MacTex® N 40.1 no se recomienda usarlo a temperaturas menores

de 3,41 °C, en promedio, ya que es vítreo y rígido, ni a temperaturas mayores de 154,44 °C ya que es cristalino, quebradizo y pierde propiedades mecánicas de tensión.

Cuadro 14. Promedio de los resultados de las transiciones térmicas para las muestras MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1

| Geotextil | Transición vítrea ($T_g$) | | | | Cristalización ($T_c$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temperatura (°C) | | | Energía (W/g) | Temperatura (°C) | | Energía (J/g) |
| | inicial | del evento | final | | inicial | del evento | |
| MacTex® N 27.1 | -13,04 | -8,13 | -3,16 | 0,0924 | 152,28 | 163,48 | 91,31 |
| | -11,10 | -5,96 | -1,18 | 0,0860 | 151,75 | 164,66 | 90,13 |
| | -13,02 | -6,96 | -0,89 | 0,0972 | 152,19 | 164,02 | 89,96 |
| **Promedio** | **-12,39** | **-7,02** | **-1,74** | **0,0919** | **152,07** | **164,05** | **90,47** |
| MacTex® N 40.1 | 1,25 | 2,35 | 3,47 | 0,0463 | 154,56 | 163,09 | 76,03 |
| | 1,33 | 2,40 | 3,45 | 0,0535 | 154,44 | 163,32 | 75,81 |
| | 1,35 | 2,41 | 3,32 | 0,0495 | 154,33 | 163,26 | 79,80 |
| **Promedio** | **1,31** | **2,39** | **3,41** | **0,0498** | **154,44** | **163,22** | **77,21** |

Con el fin de realizar una comparación gráfica de los dos tipos de geotextiles utilizados, se elige la muestra 1 del geotextil MacTex® N 27.1 y la muestra 1 del geotextil MacTex® N 40.1, con las cuales se obtiene la Figura 94.

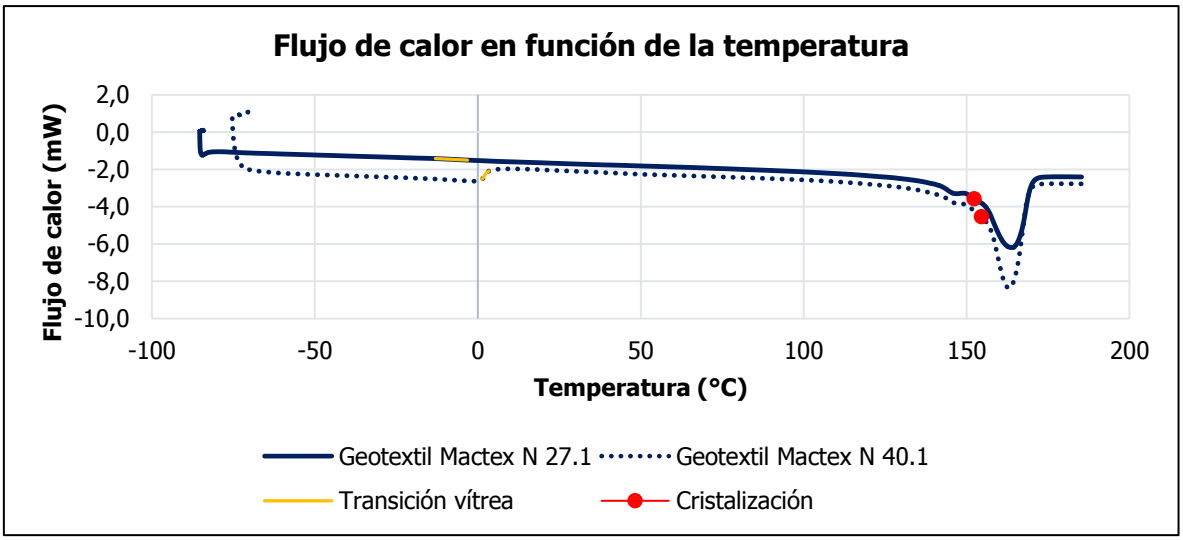



Figura 94. Comparación de curvas DSC de la muestra de geotextil MacTex® N 27.1 y MacTex® N40.1

Con el Cuadro 14 se deduce que las transiciones térmicas ocurren primero en el geotextil MacTex® N 27.1 y luego en el geotextil MacTex® N 40.1, es decir el geotextil de mayor gramaje soporta temperaturas mayores que el de menor gramaje. Esto se muestra gráficamente en la

Figura 94, donde se aprecia un desfase de la transición vítrea y de la cristalización en una curva respecto a la otra. Si bien la cristalización inicia a una temperatura mayor en el geotextil de gramaje 203 g/m$^2$ respecto al de gramaje 140 g/m$^2$, cabe resaltar que el evento máximo se da a 163,22 °C en promedio, es decir, a una temperatura menor que el geotextil de menor gramaje, 164,05 °C en promedio; esto se relaciona con los resultados obtenidos de la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier, donde el geotextil de mayor gramaje sufre mayor oxidación y por ende mayor daño térmico al tener mayor cantidad de polipropileno, tal como se mostró en los espectros de la Figura 80.

Goniometría

Para el análisis de resultados se seleccionaron las 6 mediciones con menor diferencia entre el ángulo de contacto izquierdo y el derecho para cada una de las combinaciones: geotextil MacTex® N 27.1 – ligante asfáltico, geotextil MacTex® N 40.1 – ligante asfáltico, agregado calizo – ligante asfáltico y agregado silíceo – ligante asfáltico.

En el Cuadro 15 se muestran los resultados de las mediciones de ángulo de contacto para la combinación asfalto AC-30 y el geotextil de gramaje 140 g/m$^2$ MacTex® N 27.1. Se obtiene un promedio de 75,0° para el ángulo de contacto izquierdo y 75,3° para el ángulo de contacto derecho, con una diferencia de 0,3°.

Cuadro 15. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y geotextil MacTex® N 27.1

| **Medición No.** | **Líquido** | **Sólido** | **Ángulo de contacto (°)** | | **Diferencia (°)** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Izquierdo** | **Derecho** | |
| 1 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 78,2 | 77,6 | 0,6 |
| 2 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 71,6 | 72,3 | 0,7 |
| 3 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 78,2 | 77,8 | 0,4 |
| 4 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 77,2 | 78,1 | 0,9 |
| 5 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 74,9 | 75,1 | 0,2 |
| 6 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 70,1 | 70,9 | 0,8 |
| **Promedio (°)** | | | **75,0** | **75,3** | **0,3** |

En el Cuadro 16 se muestran los resultados de las mediciones de ángulo de contacto para la combinación asfalto AC-30 y el geotextil de gramaje 203 g/m$^2$ MacTex® N 27.1. Se obtiene un

promedio de 91,6° para el ángulo de contacto izquierdo y 91,2° para el ángulo de contacto derecho, con una diferencia de 0,5°.

Cuadro 16. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y geotextil MacTex® N 40.1

| Medición No. | Líquido | Sólido | Ángulo de contacto (°) | | Diferencia (°) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Izquierdo | Derecho | |
| 1 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 81,2 | 82,7 | 1,5 |
| 2 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 99,5 | 98,4 | 1,1 |
| 3 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 93,2 | 91,9 | 1,3 |
| 4 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 98,2 | 96,9 | 1,3 |
| 5 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 88,9 | 88,7 | 0,2 |
| 6 | Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 88,8 | 88,4 | 0,4 |
| **Promedio (°)** | | | **91,6** | **91,2** | **0,5** |

En el Cuadro 17 se muestran los resultados de las mediciones de ángulo de contacto para la combinación asfalto AC-30 y el agregado calizo. Se obtiene un promedio de 143,7° para el ángulo de contacto izquierdo y 143,7° para el ángulo de contacto derecho, donde no existe diferencia entre los valores.

Cuadro 17. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y agregado calizo

| Medición No. | Líquido | Sólido | Ángulo de contacto (°) | | Diferencia (°) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Izquierdo | Derecho | |
| 1 | Asfalto AC-30 | Agregado calizo | 153,6 | 151,6 | 2,0 |
| 2 | Asfalto AC-30 | Agregado calizo | 144,8 | 143,9 | 0,9 |
| 3 | Asfalto AC-30 | Agregado calizo | 140,5 | 142,2 | 1,7 |
| 4 | Asfalto AC-30 | Agregado calizo | 141,4 | 142,5 | 1,1 |
| 5 | Asfalto AC-30 | Agregado calizo | 141,6 | 141,9 | 0,3 |
| 6 | Asfalto AC-30 | Agregado calizo | 140,5 | 139,8 | 0,7 |
| **Promedio (°)** | | | **143,7** | **143,7** | **0,0** |

En el Cuadro 18 se muestran los resultados de las mediciones de ángulo de contacto para la combinación asfalto AC-30 y el agregado silíceo. Se obtiene un promedio de 138,9° para el ángulo de contacto izquierdo y 140,1° para el ángulo de contacto derecho, con una diferencia de 1,2°.

Cuadro 18. Ángulos de contacto para la combinación asfalto AC-30 y agregado silíceo

| Medición No. | Líquido | Sólido | Ángulo de contacto (°) | | Diferencia (°) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Izquierdo | Derecho | |
| 1 | Asfalto AC-30 | Agregado silíceo | 142,5 | 143,9 | 1,4 |
| 2 | Asfalto AC-30 | Agregado silíceo | 138,6 | 139,9 | 1,3 |
| 3 | Asfalto AC-30 | Agregado silíceo | 138,3 | 138 | 0,3 |
| 4 | Asfalto AC-30 | Agregado silíceo | 138,5 | 140,2 | 1,7 |
| 5 | Asfalto AC-30 | Agregado silíceo | 138,9 | 140,7 | 1,8 |
| 6 | Asfalto AC-30 | Agregado silíceo | 136,6 | 138,1 | 1,5 |
| **Promedio (°)** | | | **138,9** | **140,1** | **1,2** |

En el Cuadro 19 se muestra la clasificación de las superficies de los geotextiles y agregados utilizados en el ensayo de goniometría según el Cuadro 9 de la sección 2.6.5 del marco teórico y de acuerdo con la norma "ASTM D7334 Humectabilidad de la superficie de recubrimientos, sustratos y pigmentos con la medición avanzada del ángulo de contacto". El geotextil MacTex® N 27.1 se clasifica como una superficie intermedia, es decir, entre hidrofílica e hidrofóbica, ya que presenta un ángulo de contacto promedio de 75,2° el cual está entre 45° y 90°, además presenta alta humectabilidad y adhesividad. El geotextil MacTex® N 40.1, el agregado calizo y el agregado silíceo se clasifican como superficies hidrofóbicas con baja humectabilidad y adhesividad, ya que sus ángulos promedio son mayores a 90° y menores a 180°. Si bien el geotextil MacTex® N 40.1 se clasifica como hidrofóbico, cabe resaltar que su ángulo de contacto promedio es cercano a los 90°, por lo que al variar las características del ligante asfáltico esta superficie puede comportarse como intermedia.

Cuadro 19. Clasificación de superficies utilizadas en el ensayo de goniometría

| Líquido | Sólido | Ángulo de contacto promedio (°) | | Promedio general (°) | Grado de mojabilidad | Clasificación de superficie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Izquierdo | Derecho | | | |
| Asfalto AC-30 | Geotextil MacTex® N 27.1 | 75,0 | 75,3 | 75,2 | Alta humectabilidad y adhesividad | Intermedia |
| Asfalto AC-31 | Geotextil MacTex® N 40.1 | 91,6 | 91,2 | 91,4 | Baja humectabilidad y adhesividad | Hidrofóbica |
| Asfalto AC-32 | Agregado calizo | 143,7 | 143,7 | 143,7 | Baja humectabilidad y adhesividad | Hidrofóbica |
| Asfalto AC-33 | Agregado silíceo | 138,9 | 140,1 | 139,5 | Baja humectabilidad y adhesividad | Hidrofóbica |

En la Figura 95 se muestra un gráfico de los resultados promedio de los ángulos de contacto para cada una de las superficies ensayadas. En este se puede notar la diferencia entre los ángulos de contacto entre el geotextil – asfalto y geotextil – agregado, donde los agregados calizo y silíceo presentan mayores ángulos de contacto, es decir, presentan menor humectabilidad y adhesividad en comparación con el geotextil. Al comparar los ángulos de contacto de ambos geotextiles se obtiene que el de menor gramaje presenta mayor humectabilidad y adhesividad, lo cual se debe a que es menos denso y más poroso donde la gota se hunde y moja más la superficie.

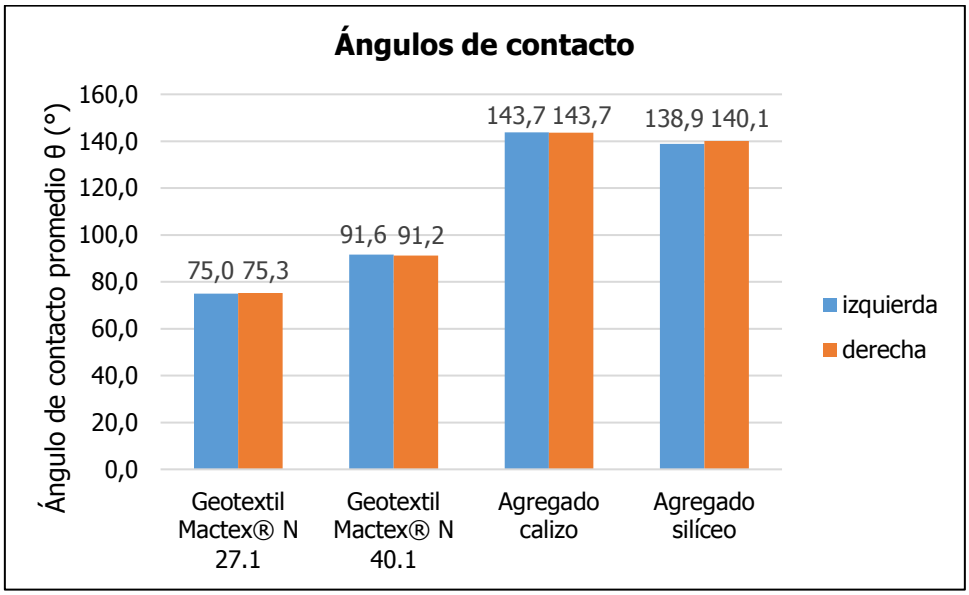



Figura 95. Resultados promedio del ensayo de goniometría para los distintos materiales

### 3.2.3. Caracterización mecánica

Resistencia a la tensión GRAB

En la Figura 96 se presentan parte de las muestras falladas en el ensayo de resistencia a la tensión GRAB.

En la Figura 97, la Figura 98, la Figura 99 y la Figura 100 se muestran las curvas de resistencia a la tensión GRAB de los dos tipos de geotextil utilizados en este proyecto sin impregnar e impregnados, respectivamente.

Figura 96. Muestras falladas en el ensayo de resistencia a la tensión GRAB

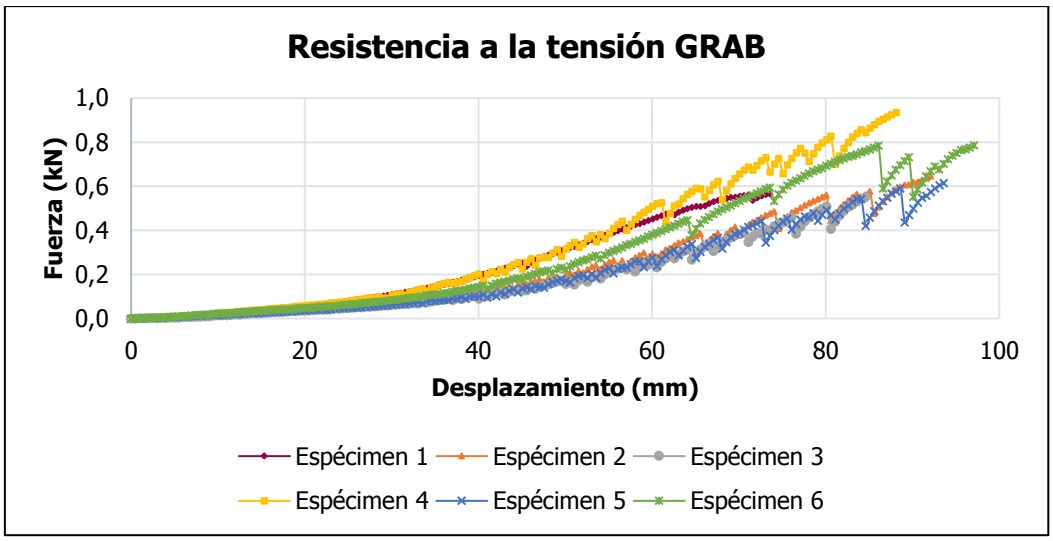



Figura 97. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 27.1 sin impregnar

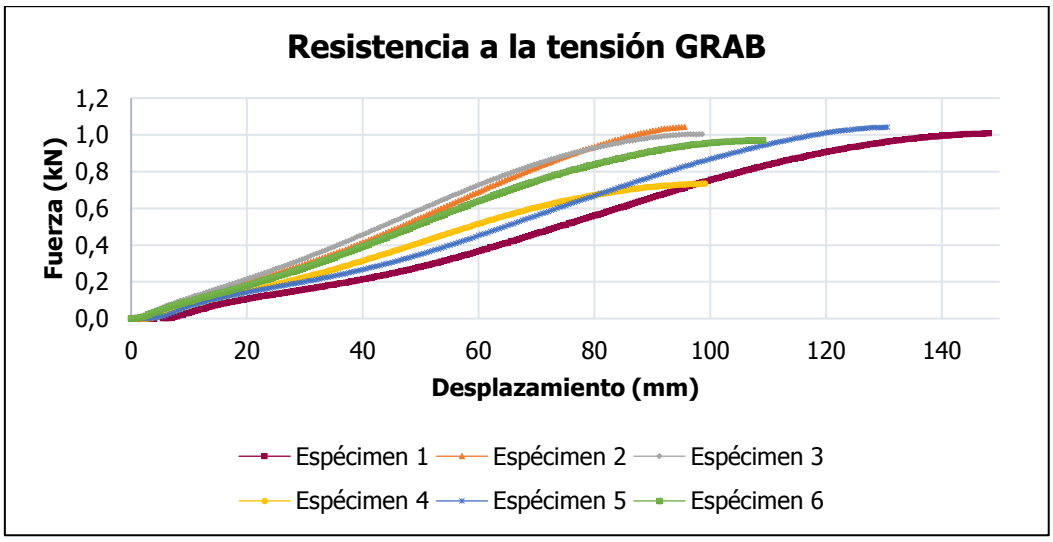



Figura 98. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 27.1 impregnado

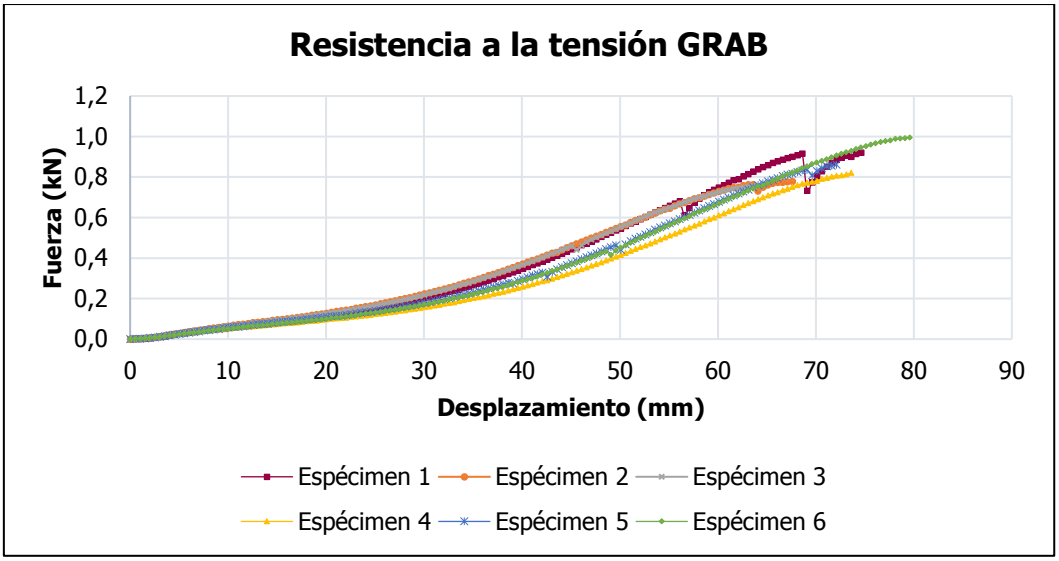



Figura 99. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 40.1 sin impregnar

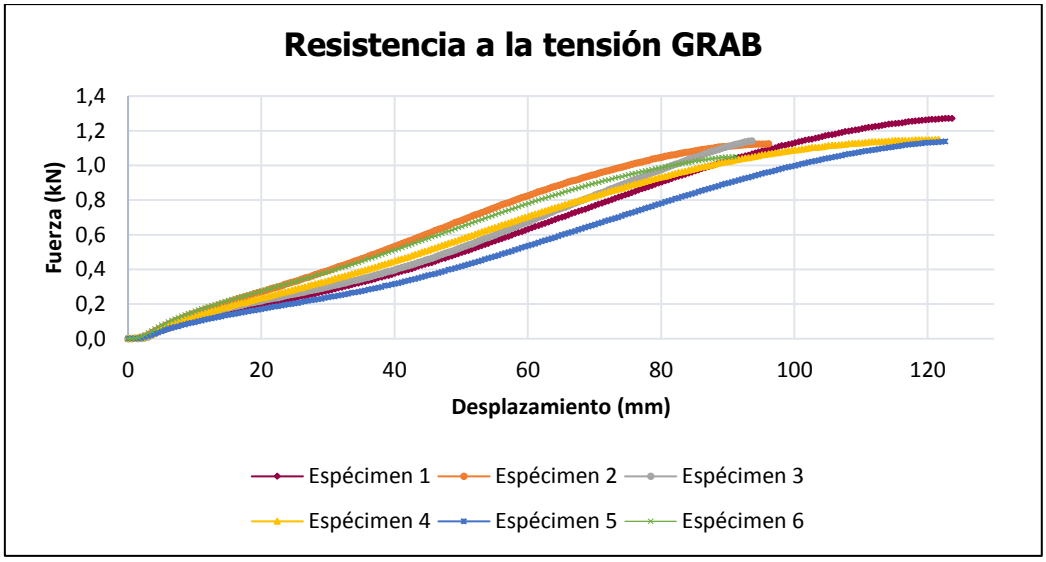



Figura 100. Curva resistencia a la tracción GRAB del geotextil MacTex® N 40.1 impregnado

En el Cuadro 20 se muestra el resumen de resultados del ensayo de tracción GRAB. En este se puede observar que, en el caso de los geotextiles no impregnados, el geotextil MacTex N 27.1 presenta menor resistencia que el geotextil MacTex N 40.1, por lo que a mayor gramaje mayor resistencia. Al comparar los geotextiles impregnados se da el mismo comportamiento que el caso anterior, el geotextil que presenta mayor resistencia es el de mayor gramaje. También se puede observar que la emulsión asfáltica le aporta resistencia al geotextil, siempre y cuando se impregne el material de la manera correcta y se dosifique con la cantidad adecuada de emulsión asfáltica.

Cuadro 20. Resultados promedio del ensayo de tensión GRAB

| Propiedad | MacTex N 27.1 sin impregnar | MacTex N 40.1 sin impregnar | MacTex N 27.1 impregnado | MacTex N 40.1 impregnado |
|---|---|---|---|---|
| **Resistencia a la tensión GRAB (N)** | 690 | 857 | 969 | 1147 |
| **Deformación longitudinal $\varepsilon_{long}$ (mm/mm)** | 0,434 | 0,353 | 0,559 | 0,532 |
| **Deformación longitudinal $\varepsilon_{long}$ (%)** | 43,4 | 35,3 | 55,9 | 53,2 |

De acuerdo con las propiedades requeridas por los geotextiles no tejidos para la prevención del reflejo de grietas del Cuadro 2, el valor mínimo promedio de la resistencia a la tensión GRAB debe ser 445 N, por lo tanto los geotextiles evaluados en esta investigación cumplen con ese valor tal como se observa en el Cuadro 20, donde la resistencia mínima hallada fue de 690 N para el caso del geotextil MacTex N 27.1 sin impregnar.

En el Cuadro 20 se puede observar que al impregnar cada geotextil, este se vuelve más dúctil y se deforma más. Además, el geotextil de mayor gramaje presenta valores menores de deformación respecto al de menor gramaje para cada uno de los casos.

De acuerdo con el Cuadro 2 la elongación debe ser mayor o igual al 50 % para que el geotextil pueda ser utilizado para la prevención del reflejo de grietas. Al observar los resultados del Cuadro 20 se tiene que en los casos sin impregnar los geotextiles no cumplen con esta propiedad requerida, solamente cumplen los especímenes impregnados con emulsión asfáltica.

Al comparar los resultados del Cuadro 20 con las especificaciones técnicas de cada geotextil, las cuales se encuentras en la sección de anexos, se tiene que tanto el geotextil impregnado como el no impregnado cumple con las propiedades de tracción GRAB establecidas por la especificación técnica de MacTex® N 27.1 (445 N) y MacTex® N 40.1 (710 N) respectivamente. Sin embargo, solamente los geotextiles impregnados con emulsión asfáltica cumplen con la propiedad de elongación GRAB mayor a 50% de las especificaciones técnicas MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 respectivamente, por lo que es importante realizar una dosificación adecuada del material.

# Capítulo IV. Conclusiones y recomendaciones

Mediante la presente investigación se logró evaluar con base en datos experimentales, la influencia de la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en las propiedades químicas y mecánicas del geotextil no tejido de polipropileno de dos gramajes comunes utilizados en carretera. A continuación, se desglosan las conclusiones y recomendaciones presentadas por actividad.

## 4.1. Conclusiones

De la fase de investigación bibliográfica:

- En la rehabilitación de pavimentos con sobrecapas asfálticas se recomienda el uso de geotextiles no tejidos, geomallas y geocompuestos como sistema intercapa para retardar el efecto de reflejo de grietas.
- Los mecanismos desarrollados por los geosintéticos en sobrecapas asfálticas son refuerzo (geomallas y geocompuestos) y alivio de esfuerzos (geotextiles no tejidos).
- El reflejo de grietas es de los principales causantes del deterioro prematuro de pavimentos, se han realizado estudios de la implementación de materiales geosintéticos para mitigar el deterioro, sin embargo, se requiere mayor investigación y la elaboración de un reglamento con el uso de estos materiales.
- Para lograr un desempeño óptimo del sistema de sobrecapa asfáltica con geotextil es necesario garantizar una técnica adecuada de construcción siguiendo los siguientes pasos principales:
    1. Nivelar y limpiar la superficie.
    2. Reparar las grietas existentes.
    3. Colocar la dosificación completa de emulsión o bien un porcentaje abajo y otro sobre el geotextil. Luego colocar el material polimérico y compactarlo aplicando una energía leve.
    4. Esperar a que rompa la emulsión.
    5. Colocar la nueva sobrecapa asfáltica.

Del ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):

- A temperatura ambiente la morfología del geotextil es de filamentos continuos de polipropileno.
- A bajas temperaturas la morfología del material no presenta cambios.
- A altas temperaturas se notan cambios en la morfología del geotextil, donde los filamentos se unen entre sí por la acción térmica y se presentan grietas es el material.
- Se evidencia que el geotextil de mayor gramaje presenta mayor cantidad de fibras continuas de polipropileno en comparación con el de menor gramaje, lo cual se debe a que es más denso.
- El geotextil de mayor gramaje acondicionado a 170 °C presenta mayor alteración térmica visualmente en comparación con el de menor gramaje acondicionado a la misma temperatura.
- Los resultados obtenidos demuestran que la Microscopia Electrónica de Barrido constituye una buena herramienta para la caracterización física , sin embargo, es necesaria su combinación con otras técnicas para poder corroborar los resultados obtenidos con su aplicación.
- Las micrografías obtenidas con SEM indicaron que el polímero que constituye el geotextil posiblemente se degrada en condiciones críticas de temperatura.

Del ensayo de Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR):

- Se obtuvo la huella digital típica del polipropileno, lo que evidencia la composición del geotextil.
- Se determina tres grupos de bandas correspondientes a movimientos de tensión de los enlaces C–H a 2900 $cm^{-1}$, movimientos de tensión C–C en (1350-1450) $cm^{-1}$ y movimientos de flexión de –CH3 entre (1200-1000) $cm^{-1}$.
- A temperatura ambiente no existen diferencias entre la forma del espectro de menor y mayor gramaje, lo cual se debe a que con la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier se logra determinar la composición química del material, y al tratarse del mismo material (polipropileno) no se presenta distinto comportamiento químico vibracional.

- A las temperaturas de 60 °C, 80 °C y 150 °C no se presentan diferencias considerables en la forma del espectro en comparación con el de temperatura ambiente, para ninguno de los dos gramajes de geotextil.
- Al someter el geotextil no tejido de polipropileno a una temperatura extrema de 170 °C este presenta daño térmico a simple vista.
- Para el geotextil de 140 g/m$^2$ acondicionado a 170 °C se hallan nuevas bandas entre 1800 cm$^{-1}$ y 1500 cm$^{-1}$ las cuales están asociadas a procesos de oxidación.
- Para el geotextil de 203 g/m$^2$ acondicionado a 170 °C se encuentran nuevas bandas entre 1800 cm$^{-1}$ y 1500 cm$^{-1}$ lo cual se debe a oxidación del material a altas temperaturas. A partir de 1300 cm$^{-1}$ el porcentaje de transmitancia baja y la forma del espectro cambia, presentando un pico máximo en 997 cm$^{-1}$ asociado a la absorción reversible de olefina donde se forma un doble enlace de carbono.
- A 170 °C el espectro del geotextil de mayor gramaje exhibe picos mayores en las zonas donde se presenta oxidación debido a este presenta mayor porcentaje de polipropileno en comparación con el de menor gramaje, por lo que existe una alteración térmica mayor.

Del ensayo de Análisis Termogravimétrico (TGA):

- A través de la derivada del porcentaje de masa en función del tiempo es posible establecer los puntos de inflexión de las curvas donde ocurren eventos térmicos.
- El someter la muestra a altas temperaturas da lugar a un aumento en el movimiento molecular, atómico o iónico, produciendo cambios en su estructura.
- En el geotextil no tejido de polipropileno se presenta un termograma típico con una pequeña pérdida inicial debido a la humedad, una segunda pérdida asignada a la descomposición térmica del material y un residuo final.
- La pérdida inicial es poco significativa en comparación con la pérdida por descomposición. El geotextil MacTex® N 27.1 de gramaje 140 g/m$^2$ presenta una pérdida por humedad de 0,36 % y una pérdida por descomposición de 98,04 % en promedio. El geotextil MacTex® N 40.1 de gramaje 203 g/m$^2$ de 0,66 % y una pérdida por descomposición de 94,47 % en promedio.

- El geotextil de menor gramaje pierde mayor masa en su proceso de descomposición al tener menos densidad que el geotextil de mayor gramaje, presentando este último mayor porcentaje de residuo.
- En el geotextil MacTex® N 27.1 de gramaje 140 g/m$^2$ la descomposición térmica inicia a 226,33 °C y en el geotextil MacTex® N 40.1 de gramaje 203 g/m$^2$ la descomposición térmica inicia a 256,63 °C, en promedio. Con lo cual se concluye que el polímero no sufre descomposición durante el proceso de colocación de sobrecapas asfálticas, ya que estas se colocan a una temperatura máxima de 165 °C, la cual está por debajo de estos resultados.
- El termograma del geotextil de mayor gramaje se traslada hacia la derecha, lo cual evidencia que inicia su proceso de descomposición a mayor temperatura en comparación con el de menor gramaje y por lo tanto se degrada menos rápido.
- Los termogramas pueden ser utilizados para definir los límites de estabilidad de la muestra.

Del ensayo de Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC):

- Con las muestras de geotextil no tejido de polipropileno evaluadas se halló el termograma típico de un polímero, en el cual se presenta transición vítrea a bajas temperaturas donde el polipropileno pasa de comportarse como un material rígido a un material fácilmente deformable y una transición térmica de cristalización donde se alcanza suficiente energía para que se dé un arreglo cristalino del material.
- Durante la cristalización se da una entalpía endotérmica donde el material absorbe calor y requiere de energía para que ocurra el proceso.
- El geotextil MacTex® N 27.1 sufre una transición vítrea a partir de -12,39 °C y hasta -1,74 °C en promedio, por lo que no se recomienda utilizarlo a temperaturas menores de -1,74 °C ya que este se rigidiza. Además, a 152,07 °C, en promedio, se da una transición de cristalización, por lo que tampoco se recomienda utilizarlo a temperaturas mayores a esta, ya que el material se torna cristalino, quebradizo y pierde propiedades mecánicas de tensión.
- De forma similar, no se recomienda utilizar el geotextil MacTex® N 40.1 a temperaturas menores de 3,41 °C, en promedio, ya que es vítreo y rígido, ni a temperaturas mayores

de 154,44 °C ya que es cristalino, quebradizo y pierde propiedades mecánicas de tensión.

- Las transiciones térmicas ocurren primero en el geotextil MacTex® N 27.1 de gramaje 140 g/m$^2$ y luego en el geotextil MacTex® N 40.1 de 203 g/m$^2$, es decir el geotextil de mayor gramaje soporta temperaturas mayores que el de menor gramaje.
- Si bien la cristalización inicia a una temperatura mayor en el geotextil de gramaje 203 g/m2 respecto al de gramaje 140 g/m2, el evento máximo se da una temperatura menor que en el geotextil de menor gramaje, lo cual se relaciona con los resultados obtenidos de la Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier, donde el geotextil de mayor gramaje sufre mayor oxidación y por ende mayor daño térmico al tener mayor cantidad de polipropileno.

Del ensayo de Goniometría:

- El geotextil MacTex® N 27.1 se clasifica como una superficie intermedia, es decir, entre hidrofílica e hidrofóbica, ya que presenta un ángulo de contacto promedio de 75,2° el cual está entre 45° y 90°, además presenta alta humectabilidad y adhesividad.
- El geotextil MacTex® N 40.1, el agregado calizo y el agregado silíceo se clasifican como superficies hidrofóbicas con baja humectabilidad y adhesividad, ya que sus ángulos promedio son mayores a 90° y menores a 180°.
- Si bien el geotextil MacTex® N 40.1 se clasifica como hidrofóbico, su ángulo de contacto promedio es cercano a los 90°, por lo que al variar las características del ligante asfáltico esta superficie puede comportarse como intermedia.
- Los agregados calizo y silíceo presentan mayores ángulos de contacto en comparación con el geotextil no tejido de polipropileno, es decir, presentan menor humectabilidad y adhesividad en comparación con el material polimérico.
- El geotextil de menor gramaje presenta mayor humectabilidad y adhesividad en comparación con el de mayor gramaje, lo cual se debe a que es menos denso y más poroso donde la gota se hunde y moja más la superficie.
- El ángulo de contacto mide únicamente la adhesión y no la cohesión interna del asfalto.

Del ensayo de Resistencia a la tensión GRAB:

- En el caso de los geotextiles no impregnados, el geotextil MacTex® N 27.1 presenta una resistencia a la tensión GRAB de 690 N y el geotextil MacTex® N 40.1 de 857 N en promedio, por lo que el geotextil de menor gramaje presenta menor resistencia que el geotextil de mayor gramaje.
- En el caso de los geotextiles impregnados con emulsión asfáltica el geotextil MacTex® N 27.1 presenta una resistencia a la tensión GRAB de 969 N y el geotextil MacTex® N 40.1 de 1147 N en promedio. Igual que el caso anterior, el geotextil de menor gramaje presenta menor resistencia que el de mayor gramaje.
- La emulsión asfáltica aporta resistencia al geotextil, siempre y cuando se impregne el material de la manera correcta y se dosifique con la cantidad adecuada.
- Los geotextiles evaluados en esta investigación cumplen con el valor mínimo promedio de la resistencia a la tensión GRAB (445 N) según las propiedades requeridas por los geotextiles no tejidos para la prevención del reflejo de grietas del Departamento de Transportes de Caltrans (2010). Sin embargo, solamente los geotextiles impregnados con emulsión asfáltica cumplen la elongación mínima del 50 %.
- Tanto el geotextil impregnado como el no impregnado cumple con las propiedades de tracción GRAB establecidas por la especificación técnica de MacTex® N 27.1 (445 N) y MacTex® N 40.1 (710 N) respectivamente.
- Solamente los geotextiles impregnados con emulsión asfáltica cumplen con la propiedad de elongación GRAB mayor a 50% de las especificaciones técnicas MacTex® N 27.1 y MacTex® N 40.1 respectivamente.
- Al impregnar con emulsión asfáltica el geotextil, este se vuelve más dúctil y se deforma más. Además, el geotextil de mayor gramaje presenta valores menores de deformación respecto al de menor gramaje para cada uno de los casos.

## 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda considerar los resultados de esta investigación en la definición de un manual de construcción para este tipo de sistemas.
- La mezcla asfáltica que se utiliza para la sobrecapa se debe colocar a una temperatura entre 140 °C y 152 °C para el geotextil de gramaje 140 g/m$^2$ y entre 140 °C y 154 °C para el geotextil de gramaje 203 g/m$^2$, para que no dañe el material polimérico.

- A bajas temperaturas el geotextil no tejido de polipropileno se rigidiza y pierde capacidad a tensión, por lo que, para el caso de un gramaje de 140 g/$m^2$ no se recomienda instalarlo a temperaturas menores de -1,74 °C y para un gramaje de 203 g/$m^2$ no se recomienda instalarlo a temperaturas menores de 3,41°C.
- Se recomienda incluir una sección de límites de temperatura, a partir de los datos obtenidos, en la sección 719 del Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010.
- Se recomienda medir, mediante sensores térmicos, la temperatura de la intercapa al colocar la mezcla asfáltica, con el fin de determinar el valor que alcanza en campo.
- En próximas investigaciones se recomienda lo siguiente:
    - Realizar el ensayo de resistencia a la tensión GRAB a especímenes de geotextil impregnado acondicionados a distintas temperaturas, con el fin de cuantificar la pérdida en resistencia del material.
    - Evaluar el efecto de la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en las geomallas y geocompuestos para incluir y comparar su desempeño con respecto al geotextil.
    - Para realizar los ensayos TGA y DSC de caracterización química se recomienda trabajar con grandes pequeñas cantidades de masa, alrededor de 5 mg, para que la temperatura resulte homogénea y se logre una mejor comparación de resultados.
    - Evaluar el desgaste del geotextil al colocar y compactar la mezcla asfáltica.

# Referencias bibliográficas


Aguiar, M. J.; Leiva, V. F.; Salazar, D. J.; Baldi, S. A.; Villegas, V. E.; Loría, S. L. (2014). *Estudio físico-químico de adhesión asfalto-agregado*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Aguiar, M. J.; Salazar, D. J.; Pacheco, F. J.; Jiménez, M. J.; Loría, S. L. (2015). *Análisis de Adhesión Asfalto-Agregado en Costa Rica*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2016). ASTM Standards. West Conshohocken, PA: American Standard for Testing and Materials.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2015). *ASTM 3418-15 Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*. American Standard for Testing and Materials.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2015). *ASTM D4632/D4632M – 15a Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles*. American Standard for Testing and Materials.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2008). *ASTM 5725 Standard Test Method for Surface Wettability and Absorbency of Sheeted Materials Using an Automated Contact Angle Tester*. American Standard for Testing and Materials.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2013). *ASTM 7334 Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement*. American Standard for Testing and Materials.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2013). *ASTM 7490-13 Standard Test Method for Measurement of the Surface Tension of Solid Coatings, Substrates and Pigments using Contact Angle Measurements*. American Standard for Testing and Materials.

American Society of Testing Materials, ASTM. (2008). *ASTM E1131-08 Standard Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*. American Standard for Testing and Materials.

Baldi, S. A.; Villegas, V. E.; Aguiar, M. J. (2016). *La oxidación y su incidencia en el daño por humedad de asfaltos*. Primera Parte. Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR. Vol 7 No.3

Beltrán, C. (2013). *Ventajas de la utilización de geosintéticos para el refuerzo de pavimento en la carrera 7 Estación Transmilenio Museo Nacional*. Bogotá: Trabajo de grado para obtener el título de especialista en ingeniería de pavimentos.

Button, J., & Lytton, R. (2015). *Guidelines for using geosynthetics with hot-mix asphalt overlays to reduce reflective cracking*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.

Colombier, G. (1997). *Cracking in pavements: nature and origin of cracks. Prevention of Reflective Cracking in Pavements* – RILEM Report 18. Edited by Vanelstraete A. and Franckien L., 1–15.

Conesa, F. J. (2000). *Curso básico de análisis térmico*. Universidad de Alicante: España.

Correia, N., Bueno, B. (2011). *Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties*. Geotextiles and Geomembranes, 29(2), 92-101.

Delbono, H. L., Giudice, C. A. (2014). *Adherence in a pavement rehabilitated with a polymeric grid used as interlayer*. Construction and Building Materials, 54, 454-459.

Departamento de Transportes de Caltrans. (2010). *Especificaciones estándar*. Extraído el 19 de setiembre, 2017, de http://caltrans-opac.ca.gov/publicat.htm

Dempsey, B. (2002). *Development and Performance of Interlayer Stress-Absorbing Composite in Asphalt Concrete Overlays*. (págs. 175-183). Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1809).

Diaz, C. (2011). *Adherencia y Colonización de Pseudomonas Fluorescens sobre Sustratos Sólidos: Influencia de la Topografía y Composición Química de la Superficie.* La Plata: Argentina. Trabajo final de graduación para obtener grado de doctorado en Química de la Universidad Nacional de La Plata.

Díaz, G. J.; Escobar, V. O.; Olivo, M. E. (2009). *Aplicación de los geosintéticos en la estructura de los pavimentos y en obras de drenaje para carreteras*. San Salvador, El Salvador: Trabajo final de graduación para optar al título de Ingeniería Civil.

Julián, F. M. (2013). *Caracterización de polipropilenos técnicos modificados con talco para su uso en parachoques*. Valencia: España. Trabajo final de graduación en Ingeniería Química de la Universidad Politécnica de Valencia.

Goacolou, H., Marchand, J. P. (1982). *Fissuration des couches de roulement*. 5ème conference internationale sur les chaussées bitumineuses. Delft.

García, S. P; López, R. C.; Hernández, M. M.; Sánchez, G. J.; Trujillo, T. E. (2015). *Aplicación de geosintéticos en pavimentación y repavimentación*. Universidad César Vallejo: Nuevo Chimbote, Perú.

Granados, C. Y. (2015). *Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas.* Universidad Distrital Francisco José De Caldas: Bogotá, Colombia.

Hemminger, W.; Sarge, M.S. (1998). *Definitions, nomenclature, terms and literatura*. Handbook of thermal analysis and calorimetry: Ohio State University, USA.

Instituto del Asfalto. (2010). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas*. Lexington, Kentuky.

Ipohorski, M.; Bozzano, P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Revista Cel*. Tomo 63 Nº 3.

James, G. (2004). *Geosynthetic materials as asphalt reinforcement interlayers: the Southern African experience*. Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04).

Julián, F. M. (2013). *Caracterización de polipropilenos técnicos modificados con talco para su uso en parachoques.* Trabajo de fin de grado en ingeniería química. Universidad Politécnica de Valencia.

Koerner, R. (1999). *Designing with geosynthetics.* New Jersey, United States of American: Prentice-Hall, Inc.

Koerner, R. (2005). *Designing with geosynthetics.* Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. (s.f.). *Equipos de laboratorio de Infraestructura Vial*. Extraído el 20 de setiembre, 2017, de https://www.lanamme.ucr.ac.cr/PDF/Catalogo_Equipos.pdf

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San

Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR. (2016). *Métodos instrumentales de ensayo para la determinación de las propiedades micromecánicas y térmicas de ligantes asfálticos*. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica: PITRA-LanammeUCR

Leiva, P. P. (2016). *Utilización de geosintéticos en pavimentos como estrategia contra el reflejo de grietas*. San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de maestría en Ingeniería del Transporte y Vías de la Universidad de Costa Rica.

Lefort, M., Sicard, D., & Merrien, P. (1999). *Techniques anti-remontée des fissures: Guide d'emploi en chaussées aéronautiques*. Bonneuil-sur-Marne, France: Service technique des bases aériennes.

Llorente, U. M.; Horta, Z. A. (1991). *Técnicas de caracterización de polímeros*. Universidad Nacional de Educación a Distancia: España.

Loría, G. (2008). *Reflective Cracking of Flexible Pavements: Literature, Review, Analysis Models, and Testing Methods*. Reno, Nevada: ProQuest Information and Learning Company.

MACAFERRI. (2010). *Manual de Criterios generales para proyecto, especificación y aplicación de geosintéticos*. 1era edición. Brasil.

Martí, B. C. (2013). *Caracterización del polipropileno de alto impacto con refuerzos de diferente naturaleza para aplicaciones en automoción.* Valencia: España. Trabajo final de graduación en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad Politécnica de Valencia.

Meira, G.R.; Gugliotta, L.M. (2016). *Caracterización de Polímeros y Coloides Poliméricos*. Universidad Nacional del Litoral: Santa Fe, Argentina.

Naranjo, U. R. (2003). *Revisión de las consideraciones básicas del diseño actual de pavimentos flexibles con refuerzo geosintético.* San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

National Transportation Product Evaluation Program, NTPEP. (2016). *Evaluation of Geotextiles*. Washington, D.C

Norambuena C. J., Zamora, B. D., Castro F. D., Vega Z. A. (2009). *Thermal analysis of geosynthetics used in the rehabilitation of pavements*. Ingeniare, 17(1), 95-100.

Norambuena, C. J., González, T. I., Fernández A. D., López R. C. (2016). *Mechanical damage evaluation of geosynthetics fibres used as anti-reflective cracking systems in asphalt pavements*. Construction and Building Materials, 109, 47-54.

Norambuena C. J., González T. I. (2015). *Influence of geosynthetic type on retarding cracking in asphalt pavements*. Construction and building Materials, 78, 421-429.

Orjuela, L. N.; Ramos, P. G. (2008). *Tutorial para el Aprendizaje de la Técnica de Espectroscopía de Infrarrojo de Transformada de Fourier (FTIR) para Estudiantes de Biofísica: Estudio de Membranas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas: Bogotá.

PAVCO, Mexichem. (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*. Bogotá D.C., Colombia: Norte Gráfico.

Pereira, A. (2002). *Utilización de Geotextiles en el Refuerzo de un Pavimento aplicado en un Tramo Experimental*. Universidad Federal de Río de Janeiro: COPPE.

Picado, M. M. (2011). *Sistemas intercapa para retardo del reflejo de grietas. San José, Costa Rica*: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Por publicar.

Pickering, M., Ramanujam, J., & Bullen, F. (2001). *The Effect of Laying Temperature on Geotextiles used in Bituminous Surfacings*. In ARRB TRANSPORT RESEARCH LTD CONFERENCE, 20TH, 2001, MELBOURNE, VICTORIA, AUSTRALIA.

Puello, J.; Afanasjevab, N.; Alvarez, M. (2013). *Thermal properties and chemical composition of bituminous materials exposed to accelerated ageing*. Santander: Road Materials and Pavement Design

Renau, J.; Faura, M. (1994). *Principios Básicos del Microscopio de Barrido Electrónico, Técnicas de Microscopia, Micromanipulación y Análisis de Imagen*. España: ISBN:84-88301-88-X.

Richaud, E., Farcas, F., Divet, L., & Benneton, J. P. (2008). *Accelerated ageing of polypropylene geotextiles, the effect of temperature, oxygen pressure and aqueous media on fibers—Methodological aspects*. Geotextiles and Geomembranes, 26(1), 71-81.

Rodríguez, T.R.; Castaño, M. V.; Martínez, M.M. (2001). *Emulsiones asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte: Sanfandila.

Rodríguez, E.; Villegas, E. (2012). *Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico.* San José, Costa Rica: LanammeUCR

Salazar, D. J.; García, A. (2016). *Métodos instrumentales de ensayo para la determinación de las propiedades micromecánicas y térmicas de ligantes asfálticos*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Schrader, B. (1989). *Raman/Infrared Atlas of Organic Compounds*. Segunda edición. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim.

Serrano, M. J. (s.f.). *ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA 1-Fundamentos*. Universidad Politécnica de Cartagena: Colombia.

Silverstein, R. M.; Bassler G. C.; Morrill, T. C. (1981). *Spectrometric Identification of Organic Compounds*. John Wiley & Sons, Inc: New York.

Skoog, D.; Holler, J.; Nieman, T. (2001). *Principios de análisis instrumental.* McGraw Hill: Universidad Complutense de Madrid.

Solano, R. M. (2016). *Estimación de la dosificación apropiada de ligante asfáltico en la rehabilitación de pavimentos flexibles con uso de geosintéticos*. San José, Costa Rica: Trabajo final de graduación para obtener grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

Solano, P. J.; Lima, S. F.; Velazquez, E.; Rodríguez, L. J.; Tejero, A. J. (2009). *Tensiómetro digital para medir ángulos de contacto líquido-sólido*. Obregón, México: XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM.

Solórzano, M.S.; Salas, C.M.; Sequeira, R. W.; Loría, S. L. (2005). *Guía para inspectores Colocación de sobrecapas asfálticas*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Sudersanan, N., Rajagopal, K., & Veeraragavan, A. (2014). *Reflection Cracking: A Review on the Potential of Interlayer System with reference to Natural Fibres*. 10th International Conference on Geosynthetic.

Villegas, V. R.; Loría, S.G.; Aguiar, M. J; Navas, C. N. (2013). *Metodología integral de incorporación eficaz de modificantes en matrices asfálticas*. Publicaciones PITRA, LANAMMEUCR.

Villegas, V. R.; Loría, S.G.; Aguiar, M. J.; Corrales, A. J.; Fernández, G. W.; Reyes, L. F. (2012). *Métodos avanzados de análisis de ciencia de los materiales y nanomateriales utilizados en la modificación de asfaltos*. LANAMMEUCR.

Zambrano, A. A. (2014). *Aproximación conceptual al análisis térmico y sus principales aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia: Bogotá D.C.

Zambrano, M. D. (2015). *Estudio calorimétrico mediante análisis por DSC y TGA de la degradación de recubrimientos de YSZ depositados por Air Plasma Spray.* Universidad Nacional de Colombia: Medellín.

# A. Apéndice

## A.1. Síntesis de los ensayos realizados

Cuadro A1. Ensayos realizados

| Propiedad | Ensayo | Descripción |
|---|---|---|
| Química | Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) | Método que estudia la morfología de las superficies. La imagen entregada por el SEM se genera por la interacción de un haz de electrones que "barre" un área determinada sobre la superficie de la muestra. |
| | Análisis Termogravimétrico (TGA) | "La técnica es utilizada para determinar la descomposición del material y para predecir su estabilidad térmica." (Villegas, Loría, Aguiar y Navas, 2013). |
| | Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) | "El análisis se usa comúnmente en la determinación de las transiciones térmicas de primer orden (fusión y cristalización) y de segundo orden (transición vítrea)" (Villegas et al., 2013). |
| | Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) | La muestra se somete a radiación infrarroja, el espectro resultante representa la absorción y transmisión de la energía molecular y puede ser considerada como una huella digital de la misma. El FTIR permite verificar la calidad de la muestra, ya que el espectro resultante se compara contra espectros de muestras con propiedades definidas y conocidas. (Villegas, Loría, Aguiar, Corrales, Fernández y Reyes, 2012) |
| | Goniometría | Mide el ángulo de contacto entre los materiales y permiten definir la adhesión y energía superficial. (Baldi, Villegas y Aguiar, 2016) |
| Mecánica | Resistencia a la tensión (ASTM D4632) | "Se usa para evaluar la calidad del geosintético y para realizar la formulación de diseños. Esta propiedad se expresa en términos de carga por unidad de ancho del material en lugar de tensión." (Solano, 2016) |

## A.2. Propuesta de modificación a las secciones del CR-2010

### A.2.1. Especificación actual Sección 714.) MATERIALES GEOCOMPUESTOS Y GEOTEXTILES PARA DRENAJE

714.01 Geotextiles.

(a) Requisitos físicos. Los geotextiles especificados deben cumplir con las especificaciones dadas en la tabla siguiente:

(6) Tipo VI Geotextil para pavimentación Tabla 714-6

Cuadro A2. Requisitos físicos para tejido de pavimentación. Tabla 714-6

| Propiedad | Ensayo | Unidades | Valor Mínimo Promedio por Rollo (VMPR) |
|---|---|---|---|
| Resistencia al agarre | ASTM 4632 | N | 500 |
| Elongación última | ASTM D 4632 | N | 50% en la ruptura |
| Retención asfáltica | Texas DOT renglón de pago 3099 | $l/m^2$ | 0,90 |
| Punto de fusión | ASTM D 276 | °C | 150 |

Fuente: CR-2010, 2010

(b) Procedimientos de evaluación. Los geotextiles serán evaluados conforme a la Subsección 107.03.

Se debe suministrar un certificado comercial que incluya el nombre del fabricante, nombre del producto, código o tipo, composición química de los filamentos o cordones y otra información relevante del material.

### A.2.2. Modificación Sección 714.) MATERIALES GEOCOMPUESTOS Y GEOTEXTILES UTILIZADOS EN CARRETERAS

714.01 Geotextiles.

(a) Requisitos físicos. Los geotextiles especificados deben cumplir con las especificaciones dadas en la tabla siguiente:

(6) Tipo VI Geotextil para pavimentación Tabla 714-6

Cuadro A3. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de bajo volumen

| Propiedad | Normas de ensayo | Unidades | Resultados |
|---|---|---|---|
| Resistencia al agarre | ASTM D 4632 | N | 400 |
| Elongación última | ASTM D 4632 | % | 50% en la ruptura |
| Masa por unidad de área (gramaje) | ASTM D 5261 | $g/m^2$ | 122 (*) |
| Tasa de aplicación de ligante asfáltico | Proyecto de investigación LanammeUCR | $l/m^2$ | 0,70-0,80 (*) |
| Punto de fusión | ASTM D 276 | °C | 160 |
| Resistencia a rayos UV | ASTM D 4355 | % | 70 en 150 horas |

(*) Para gramaje distinto utilizar la Ecuación A

Fuente: NTPEP, 2016 (modificado por Solano, 2016)

Cuadro A4. Requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos de carreteras de alto volumen

| Propiedad | Normas de ensayo | Unidades | Resultados |
|---|---|---|---|
| Resistencia al agarre | ASTM D 4632 | N | 449 |
| Elongación última | ASTM D 4632 | % | 50% en la ruptura |
| Masa por unidad de área (gramaje) | ASTM D 5261 | $g/m^2$ | 139 (*) |
| Tasa de aplicación de ligante asfáltico | Proyecto de investigación LanammeUCR | $l/m^2$ | 0,90-1,0 (*) |
| Punto de fusión | ASTM D 276 | °C | 160 |
| Resistencia a rayos UV | ASTM D 4355 | % | 70 en 150 horas |

(*) Para gramaje distinto utilizar la Ecuación A

Fuente: NTPEP, 2016 (modificado por Solano, 2016)

De acuerdo con el proyecto de graduación de licenciatura: ESTIMACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN APROPIADA DE LIGANTE ASFÁLTICO EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON USO DE GEOSINTÉTICOS (2016), elaborado por Mario Solano Rodríguez, se realiza la siguiente consideración en la tasa de aplicación de ligante asfáltico:

(*) En caso de que se requiera utilizar otro tipo de geotextil con un gramaje diferente se deberá utilizar la Ecuación A para determinar la dosificación del ligante asfáltico.

$$D = 0{,}077 + 5{,}703 \times 10^{-3} * G + 2{,}558 * \gamma \qquad \text{Ecuación A}$$

$$R^2_{ajustado} = 0{,}750$$

Donde,

$D$: dosificación de ligante asfáltico [l/m$^2$]

$G$: gramaje del geotextil [g/m$^2$]

$\gamma$: deformación máxima [strain]

El parámetro de deformación máxima producido en la interfaz de la sobrecapa, se puede determinar por medio de un software para el diseño de pavimentos flexibles.

(b) Procedimientos de evaluación. Los geotextiles serán evaluados conforme a la Subsección 107.03.

Se debe suministrar un certificado comercial que incluya el nombre del fabricante, nombre del producto, código o tipo, composición química de los filamentos o cordones, punto de ablandamiento, resistencia al agarre (tensión GRAB), elongación última (elongación GRAB), gramaje, retención de asfalto, punto de fusión, resistencia a rayos UV y otra información que se considere relevante.

Se propone cambiar la tabla de requisitos físicos para tejido de pavimentación por la de requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en pavimentos dependiendo del volumen de tránsito elaborada por el Programa Nacional de Evaluación de Productos de Transportes. Se recomienda esta tabla ya que hace una diferencia entre carreteras de bajo y alto volumen, incorporando la propiedad de masa por unidad de área (gramaje), la cual es determinante en el funcionamiento de la sobrecapa asfáltica y está directamente relacionada con la propiedad de retención de asfalto, ya que para un adecuado desempeño el material debe quedar impregnado de ligante asfáltico. Además, de acuerdo al gramaje es el costo del geotextil.

Se plantea incorporar más información al certificado comercial de tal forma que se pueda comparar la ficha técnica con los requerimientos mínimos para los geotextiles utilizados en repavimentación.

### A.2.3. Especificación actual Sección 719.) GEOTEXTILES PARA PAVIMENTOS

719.03 Preparación de la superficie.

El Contratista preparará la superficie sobre la cual se colocará la tela geotextil, asegurándose de limpiar antes de la colocación la superficie existente y eliminando cualquier material suelto, polvo, tierra u otras substancias deletéreas o degradables que impidan o disminuyan una adecuada adherencia. El método de limpieza utilizado debe ser tal que garantice las condiciones descritas anteriormente y en concordancia con lo establecido y aprobado contractualmente.

719.04 Limitación de condiciones climáticas.

El Contratista aplicará la tela geotextil y el sello asfáltico en una superficie seca, cuando la superficie del pavimento esté por lo menos a 13°C, e incrementándose.

719.05 Aplicación del sello asfáltico.

El contratista aplicará cemento asfáltico dentro de un rango de temperatura de 140°C a 165°C; o emulsión asfáltica dentro de un rango de temperatura de 55°C a 70°C, o asfalto rebajado dentro del rango de temperatura que defina el Contratante. El Contratante definirá la aplicación de uno u otro tipo de cemento asfáltico, así como el grado correspondiente.

El sello con cemento asfáltico, será aplicado sobre la superficie de pavimento, de acuerdo con la Subsección 411.08, a una tasa de dosificación entre 0,90 y 1,35 litros por metro cuadrado. La aplicación del cemento asfáltico, tal como se detalla en la Sección 411.08 debe realizarse de forma homogénea sobre toda la superficie, calibrando las barras del distribuidor de asfalto en cuanto a su altura, ángulo de rocío y presión de bombeo. Cada una de las boquillas debe ajustarse en un ángulo de 15 a 30 grados, respecto al eje horizontal de la barra, nunca en ángulos de 60 a 90 grados. El cubrimiento transversal no debe variar en más de un 15 %, y el longitudinal en más de un 10 %.

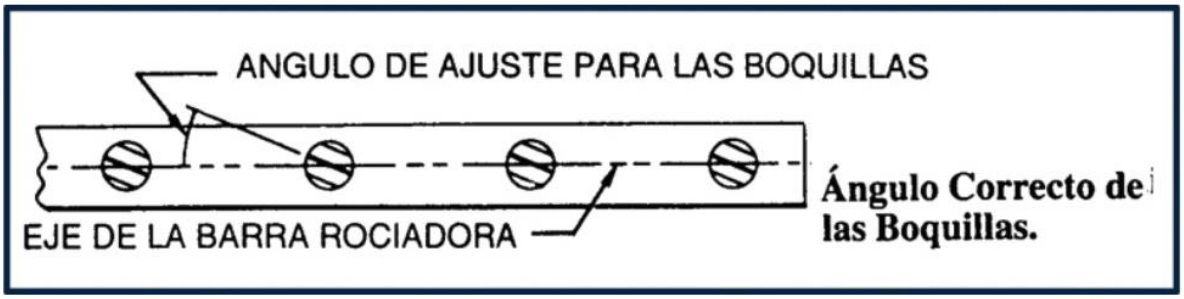



Figura A1. Ángulo correcto de las boquillas del distribuidor

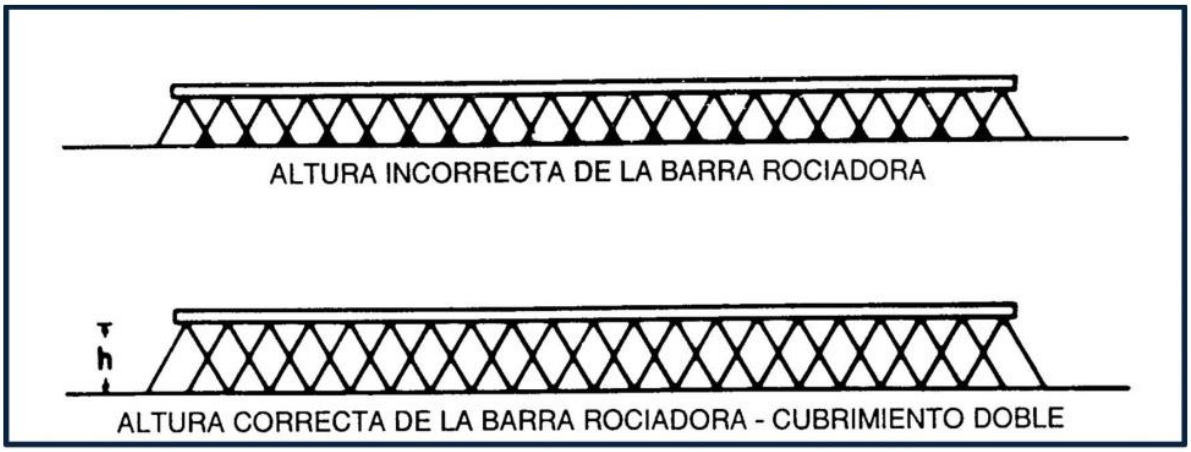



Figura A2. Ángulo correcto de las boquillas del distribuidor

Se debe tener sumo cuidado de no exceder la tasa de aplicación en las zonas de inicio y final del área de rocío. Se puede utilizar algún material, como láminas de papel al inicio de la aplicación, hasta que el distribuidor alcance la velocidad de aplicación correcta para lograr obtener la tasa de aplicación requerida.

Se distribuirá el sello asfáltico en un ancho que exceda en 150 mm el ancho de la tela geotextil. El sello asfáltico deberá aplicarse con la anticipación adecuada a la colocación de la tela geotextil. Deberá evitarse, además, que haya circulación de vehículos sobre el sello asfáltico, de previo a la colocación de la tela geotextil.

Cuando se utilice asfalto rebajado o emulsión asfáltica, se permitirá que éste cure antes de la colocación de la tela geotextil.

Cuando se utilice cemento asfáltico, se colocará la tela geotextil antes de que éste se haya enfriado y perdido pegajosidad al tacto.

719.06 Colocación de la tela geotextil.

El Contratista colocará la tela geotextil sobre el sello asfáltico, de manera que no se formen arrugas en su extendido. Se deberán suprimir, aplanar o nivelar, todas las arrugas o corrugaciones de una altura superior a veinticinco (25) milímetros. Se extenderá la tela geotextil de manera que se maximice el contacto con la superficie de apoyo, ya sea por medio de barrido o aplanado.

El Contratista proveerá traslapes de 150 mm en las juntas entre dos tendidos adyacentes de tela geotextil. Deberá proveerse un traslape en las juntas transversales, en la dirección de la pavimentación, para prevenir el desplazamiento o levantamiento de los bordes en las juntas por efecto de la pavimentadora. Se aplicará un sello asfáltico adicional sobre los traslapes de los geotextiles, para asegurar la propia adherencia de la doble tela geotextil en tales áreas.

Si el cemento asfáltico exuda a través de la tela geotextil, se deberá tratar el área afectada con un material de secado. Se evitará el tránsito sobre el geotextil. Si las circunstancias requieren la circulación de vehículos, se deberá aplicar un material de secado sobre la superficie de ruedo y se deberán proveer rótulos de advertencia con la leyenda "Posibilidad de derrape". Corresponderá al Contratante el definir cuándo se permite el tránsito de vehículos sobre la tela geotextil.

El Contratista deberá remover el exceso de material de secado de la superficie de la tela geotextil, de previo a la colocación de la capa superior en la estructura de pavimento. Se repararán todos los daños sobre la tela geotextil, de previo a la colocación de la capa superior en la estructura de pavimento. Se distribuirá una aplicación ligera de riego de liga, de acuerdo con la Sección 414, antes de la colocación de una sobrecapa asfáltica. Para prevenir el daño de la tela geotextil, no deberán permitirse virajes a los equipos de pavimentación que operen sobre la misma.

El Contratista deberá colocar una sobrecapa de concreto asfáltico dentro de un plazo no mayor a 48 horas posterior a la colocación de la tela geotextil. Se limitará la temperatura de colocación de la sobrecapa asfáltica sobre la tela geotextil a un máximo de 165 °C, excepto cuando la tela geotextil esté compuesta de fibras de polipropileno, en cuyo caso se limitará la temperatura de colocación de la sobrecapa asfáltica a un máximo de 150 °C.

719.07 Aceptación.

El material asfáltico será evaluado de acuerdo con las Subsecciones 107.04 y la respectiva Subsección de la Sección 702. La tela geotextil será evaluada de acuerdo con las Subsecciones 107.02, 107.03 y 719.01.

La colocación de la tela geotextil será evaluada de conformidad con las Subsecciones 107.02 y 107.04.

La preparación de la superfcie donde se colocará el sello asfáltico y la tela geotextil será evaluada de acuerdo con la Sección 303.

719.08 Medida.

Se medirá la cantidad de tela geotextil por metro cuadrado, excluyendo traslapes. Se medirá la cantidad de sello asfáltico por litro.

719.09 Pago.

Las cantidades aceptadas, medidas de acuerdo con la Subsección 414.08, serán pagadas según el precio de contrato, por unidad de medida, para los renglones de pago indicados en los términos del contrato. El pago será la compensación para los trabajos descritos en esta Sección. Véase la Subsección 110.05.

El pago se realizará de acuerdo con:

Cuadro A5. Condiciones de pago

| Renglón de pago | Unidad de medida |
|---|---|
| **CR.719.01** Tela geotextil | Metro cuadrado ($m^2$) |
| **CR.719.02** Sello asfáltico | Litro (l) |

### A.2.4. Modificación Sección 719.) GEOTEXTILES PARA PAVIMENTOS

De acuerdo con Koerner (2005) en su libro "Diseñando con Geosintéticos", MACAFERRI (2010) en el "Manual de Criterios generales para proyecto, especificación y aplicación de geosintéticos" y PAVCO (2012) en el "Manual de Diseño con Geosintéticos", se describen las siguientes modificaciones al procedimiento que se debe seguir al construir sobrecapas asfálticas con el

uso de geotextiles, de manera tal que se prevenga la reflexión de grietas en el pavimento flexible.

719.03 Preparación de la superficie.

Condiciones generales

No se debe de realizar este tipo de obra durante días de lluvia o bajo riesgo de lluvia, la presencia de agua en la superficie de trabajo genera problemas de adherencia y daño por humedad en la mezcla asfáltica.

Se debe sellar todas las grietas con un material apropiado para este fin, teniendo el cuidado de no sobrepasar el nivel existente. El sello de grietas es únicamente para grietas superficiales, si se tiene un deterioro debido a una falla estructural este se debe intervenir de la manera más adecuada según sea la situación.

Ningún material asfáltico debe ser instalado con a una temperatura ambiente inferior a 10 °C.

Condiciones generales para la preparación de la superficie

Antes de la labor de sobrecapas asfálticas se debe garantizar ciertas características del estado del pavimento existente. En caso de ser necesario, se debe realizar algunos trabajos preliminares como el bacheo en sitios donde se considere adecuado reestablecer las características de soporte, sello de grietas o un perfilado de la superficie con el fin de eliminar deterioros existentes y proveer una regularidad adecuada. Cuando se utiliza un sistema intercapa, el pavimento existente debe recibir tratamiento de acuerdo a su condición, tal como se muestra en el Cuadro A5.

Cuadro A6. Condiciones del pavimento cuando se utilizan sistemas intercapa

| **Tipo de deterioro** | **Comentario** |
|---|---|
| Grietas superficiales | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse |
| Grietas de bloque | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse |
| Grietas longitudinales o transversales | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse |
| Fatiga cuero de lagarto | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse (dependiendo del mecanismo de deformación) |

| Tipo de deterioro | Comentario |
|---|---|
| Bombeo | Grietas >7 mm de espesor deben rellenarse. Si el bombeo se debe a agua en la base, drenar el suelo antes de la instalación. |
| Ahuellamiento | Nivelar |
| Huecos | Los huecos deben rellenarse |
| Baches | Rellenar y reparar |
| Grietas de borde | Reparar o reconstruir |
| Rellenos | Sellar las grietas entre el pavimento existente y el relleno |

Fuente: James, 2004

Si se realiza el perfilado, este debe hacerse a temperatura ambiente y sin adición de solventes u productos ablandadores que puedan afectar la granulometría de los agregados o las propiedades del asfalto existente.

Para garantizar una adecuada adhesión del geotextil a la capa de rodadura existente y a la de repavimentación, el Contratista preparará la superficie sobre la cual se colocará la tela geotextil, asegurándose de limpiar antes de la colocación la superficie existente y eliminando cualquier material suelto, polvo, tierra, vegetación, agua u otras substancias deletéreas o degradables que puedan interferir entre el ligante asfáltico y la carpeta vieja. El método de limpieza utilizado debe ser tal que garantice las condiciones descritas anteriormente y en concordancia con lo establecido y aprobado contractualmente, se recomienda utilizar un equipo de aire a presión que permite eliminar las partículas de la superficie y complementarlo con el barrido manual y mecánico para eliminar las partículas menos gruesas.

719.04 Limitaciones de temperatura.

Condiciones climáticas

El Contratista aplicará la tela geotextil y el sello asfáltico en una superficie seca, cuando la superficie del pavimento esté por lo menos a 13°C, e incrementándose.

Aplicación del sello asfáltico

El contratista aplicará cemento asfáltico dentro de un rango de temperatura de 140°C a 165°C; o emulsión asfáltica dentro de un rango de temperatura de 55°C a 70°C. En el caso de

geotextiles de polipropileno o cualquier otro polímero que tenga un punto de fusión igual o menor a 150 °C se prohíbe el uso de cemento asfáltico como material adherente.

Colocación de mezcla asfáltica

Si se utilizan geotextiles de polipropileno o cualquier otro polímero que tenga un punto de fusión igual o menor a 150 °C, el contratista colocará la mezcla asfáltica de la sobrecapa a una temperatura máxima de 150 °C, para que no dañe el material polimérico.

719.05 Aplicación del sello asfáltico.

El Contratante definirá la aplicación del tipo de cemento asfáltico, así como el grado correspondiente, siempre y cuando cumpla con la sección 719.04.

La capa de emulsión asfáltica debe ser suficiente para que el geotextil, la capa asfáltica ya existente y la nueva sobrecapa de pavimento asfáltico se unan entre sí y formen un sistema unicapa. Por lo tanto, la tasa de aplicación de la emulsión depende de las condiciones en las que se encuentre el pavimento antiguo y de la capacidad de absorción del geotextil a utilizar.

Se recomienda aplicar un porcentaje de la emulsión en la superficie existente y otro porcentaje sobre el geotextil, antes de colocar la sobrecapa asfáltica.

A continuación, se presentan las condiciones generales para realizar la aplicación del ligante asfáltico:

La emulsión o ligante asfáltico no puede ser aplicado en superficies mojadas.

Se debe mantener una circulación periódica en los depósitos donde se alberga la emulsión, para evitar la sedimentación de la misma.

La emulsión debe mantenerse en un rango de temperaturas desde los 55 °C hasta los 70 °C, para una mejor trabajabilidad y evitar la rotura antes de lo deseado.

La aplicación del ligante asfáltico, tal como se detalla en la Sección 411.08 debe realizarse de forma homogénea sobre toda la superficie, calibrando las barras del distribuidor de asfalto en cuanto a su altura, ángulo de rocío y presión de bombeo. Cada una de las boquillas debe ajustarse en un ángulo de 15 a 30 grados, respecto al eje horizontal de la barra, nunca en

ángulos de 60 a 90 grados. El cubrimiento transversal no debe variar en más de un 15 %, y el longitudinal en más de un 10 %.

Figura A3. Ángulo correcto de las boquillas del distribuidor

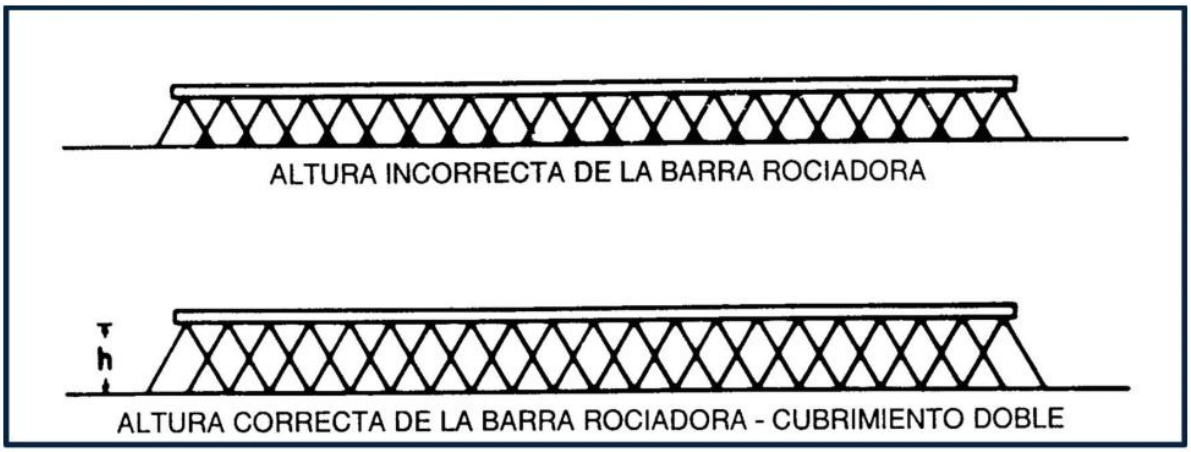



Figura A4. Altura correcta de las boquillas del distribuidor

Es importante que las tasas de aplicación del ligante residual se establezcan antes de iniciar el proyecto y que se ajusten en el campo al inicio de la obra, conforme a las condiciones particulares.

Se recomienda aplicar de un 70 % a un 80 % de ligante asfáltico a la tasa definida experimentalmente sobre la capa existente, y el restante 30 % o 20 % luego de instalar el geotextil.

Se debe tener sumo cuidado de no exceder la tasa de aplicación en las zonas de inicio y final del área de rocío. Se puede utilizar algún material, como láminas de papel al inicio de la aplicación, hasta que el distribuidor alcance la velocidad de aplicación correcta para lograr obtener la tasa de aplicación requerida.

Se distribuirá el sello asfáltico en un ancho que exceda en 150 mm el ancho de la tela geotextil. El sello asfáltico deberá aplicarse con la anticipación adecuada a la colocación de la tela geotextil. Deberá evitarse, además, que haya circulación de vehículos sobre el sello asfáltico, de previo a la colocación de la tela geotextil.

Cuando se utilice emulsión asfáltica, se permitirá que éste cure antes de la colocación de la tela geotextil. El tiempo de ruptura está directamente relacionado con las condiciones climáticas, viento, humedad y temperatura ambiente. Esto puede tardar de 30 min a 4 horas según el tipo de emulsión.

Cuando se utilice cemento asfáltico, se colocará la tela geotextil antes de que éste se haya enfriado y perdido pegajosidad al tacto.

719.06 Colocación de la tela geotextil.

No se puede utilizar el geotextil en condiciones mojadas o húmedas. En caso que el material se moje completamente debido a una lluvia cuando ya ha sido instalado, se debe secar totalmente para continuar con la técnica. Se pueden utilizar sopladores con aire a presión para eliminar toda la humedad presente en el material.

El geotextil se debe colocar cuando se haya verificado la ruptura de la emulsión asfáltica, ya que la presencia de agua entre el material y el pavimento antiguo es dañina para el desempeño de la estructura.

La instalación del material geosintético puede realizarse de manera manual, siendo necesaria una cuadrilla de tres personas (dos manteniendo la alineación del rollo y desenrollándolo, y una cepillando sobre el geotextil, eliminado al máximo las arrugas que se generen), o con equipo mecánico especializado.

Se debe tomar todos los cuidados necesarios, para limitar la formación de ondulaciones o arrugas en el material, ya que estas no permitirán que la absorción del asfalto líquido sea suficiente para la formación de la barrera impermeable reduciendo los beneficios a largo plazo de esta membrana de intercapa.

En caso de que se presenten arrugas se tienen las siguientes recomendaciones:

- Las arrugas y dobleces de más de 25 mm deberán rasgarse y aplanarse, en sentido del avance de los equipos de pavimentación.
- Si la arruga o doblez sobrepasa los 50 mm, este exceso deberá ser eliminado.
- El corte y enmienda del material debe ser por medio de la superposición mínima.

El Contratista proveerá traslapes de 150 mm en las juntas entre dos tendidos adyacentes de tela geotextil. Deberá proveerse un traslape en las juntas transversales, en la dirección de la pavimentación, para prevenir el desplazamiento o levantamiento de los bordes en las juntas por efecto de la pavimentadora. Se aplicará un sello asfáltico adicional sobre los traslapes de los geotextiles, para asegurar la propia adherencia de la doble tela geotextil en tales áreas. Se debe evitar superposiciones en las regiones de solicitación de las cargas de tránsito.

Para garantizar la adherencia entre el geotextil, la superficie de pavimento existente y para ayudar a la eliminación de arrugas, se debe compactar geosintético con un compactador neumático con baja presión entre 0,28 MPa y 0,35 MPa (2,80 kg/cm$^2$ a 3,60 kg/cm$^2$). También, se recomienda entre dos o tres pasadas a baja velocidad del compactador para inducir la penetración del ligante asfáltico en el geotextil.

Cuando se está instalando el material en zona de curva, se debe de cortar en pequeñas secciones en forma rectangular como si se estuviera armando la curva por segmentos, cumpliendo con la distancia de traslapos del material.

Si el cemento asfáltico exuda a través de la tela geotextil, se deberá tratar el área afectada con un material de secado. Se evitará el tránsito sobre el geotextil. Si las circunstancias requieren la circulación de vehículos, se deberá aplicar un material de secado sobre la superficie de ruedo y se deberán proveer rótulos de advertencia con la leyenda "Posibilidad de derrape". Corresponderá al Contratante el definir cuándo se permite el tránsito de vehículos sobre la tela geotextil.

El Contratista deberá remover el exceso de material de secado de la superficie de la tela geotextil, de previo a la colocación de la capa superior en la estructura de pavimento. Se repararán todos los daños sobre la tela geotextil, de previo a la colocación de la capa superior en la estructura de pavimento. Se distribuirá una aplicación ligera de riego de liga, de acuerdo con la Sección 414, antes de la colocación de una sobrecapa asfáltica. Para prevenir el daño

de la tela geotextil, no deberán permitirse virajes a los equipos de pavimentación que operen sobre la misma.

719.07 Instalación de la capa de repavimentación.

El Contratista deberá colocar una sobrecapa de concreto asfáltico dentro de un plazo no mayor a 48 horas posterior a la colocación de la tela geotextil. Se limitará la temperatura de colocación de la sobrecapa asfáltica sobre la tela geotextil a un máximo de 165 °C, excepto cuando la tela geotextil esté compuesta de fibras de polipropileno o algún otro polímero con un punto de fusión menor a 150 °C, en cuyo caso se limitará la temperatura de colocación de la sobrecapa asfáltica a un máximo de 150 °C.

Si se realizó una segunda aplicación de emulsión asfáltica sobre el geotextil, se debe de esperar a que esta rompa. Después de esto, se procede a aplicar la pintura de conexión, esparciendo manualmente mezcla asfáltica (la misma que se va a utilizar en la nueva capa) a lo largo de la faja de las huellas de la pavimentadora (Finisher) y de las ruedas de las vagonetas, con el fin de no dañar el material geosintético.

Después de efectuar la aplicación de pintura de conexión, la colocación de la sobrecapa asfáltica se realiza de igual forma que en cualquier proceso de instalación y compactación de mezcla asfáltica, con la precaución de no realizar maniobras bruscas, que puedan rasgar el material geosintético.

En pavimentos flexibles, al igual que en cualquier procedimiento de repavimentación, el espesor mínimo de la nueva capa debe ser de 5 cm hasta una pendiente máxima de 4% en sentido longitudinal y de 7 cm en pendientes longitudinales de 4% en adelante. Si no se utilizan estos espesores recomendados, la capa conformada por el geosintético puede empezar a absorber esfuerzos de tracción muy altos debido al movimiento de los vehículos, para los cuales esta capa no ha sido diseñada y de este modo obtener resultados no deseados en la aplicación de esta técnica.

719.08 Aceptación.

El material asfáltico será evaluado de acuerdo con las Subsecciones 107.04 y la respectiva Subsección de la Sección 702. La tela geotextil será evaluada de acuerdo con las Subsecciones 107.02, 107.03 y 719.01.

La colocación de la tela geotextil será evaluada de conformidad con las Subsecciones 107.02 y 107.04.

La preparación de la superfcie donde se colocará el sello asfáltico y la tela geotextil será evaluada de acuerdo con la Sección 303.

719.09 Medida.

Se medirá la cantidad de tela geotextil por metro cuadrado, excluyendo traslapes. Se medirá la cantidad de sello asfáltico por litro.

719.10 Pago.

Las cantidades aceptadas, medidas de acuerdo con la Subsección 414.08, serán pagadas según el precio de contrato, por unidad de medida, para los renglones de pago indicados en los términos del contrato. El pago será la compensación para los trabajos descritos en esta Sección. Véase la Subsección 110.05.

El pago se realizará de acuerdo con:

Cuadro A7. Condiciones de pago

| Renglón de pago | Unidad de medida |
|---|---|
| **CR.719.01** Tela geotextil | Metro cuadrado ($m^2$) |
| **CR.719.02** Sello asfáltico | Litro (l) |

## A.3. Datos de salida de los ensayos realizados

# B. Anexos

Cuadro B1. Proyectos de conservación vial con geosintéticos en Costa Rica

| Proyecto | Año de la intervención | Ruta Nacional | Secciones de control | Cantidad intervenida ($m^2$) | Precio unitario (₡/$m^2$) | Costo (₡) | Material geosintético utilizado | Justificación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 22, Zona 1-1, San José. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°2 | 2011 | 2 | 19001, 19004, 19005 | 28900 | 2.756,79 | 79.671.231,00 | Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco | Disminuir el reflejo de las grietas y juntas de las losas de concreto en la sobrecapa |
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 22, Zona 1-1, San José. Contratación Directa Autorizada N°2014LN-000140-0CV00, Orden de Servicio N°4 | 2015 | 2 | 19001, 19004, 19006 | 15500 | 2.756,79 | 42.730.245,00 | Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco | Disminuir el reflejo de las grietas y juntas de las losas de concreto en la sobrecapa |
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 21, Zona 1-2, Puriscal. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°3 | 2014 | 10203 | 19302 | 10500 | 2.756,79 | 28.946.295,00 | Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco | Disminuir el reflejo de las grietas y juntas de las losas de concreto en la sobrecapa |
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 21, Zona 1-2, Puriscal. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°4 | 2014 | 310 | 10772, 10771 | 16113,96 | 2.756,79 | 44.422.803,79 | Geomalla de fibra de vidrio R-50 Pavco | Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa |

| Proyecto | Año de la intervención | Ruta Nacional | Secciones de control | Cantidad intervenida ($m^2$) | Precio unitario (₡/$m^2$) | Costo (₡) | Material geosintético utilizado | Justificación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 16, Zona 1-7, Cartago. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°6 | 2014 | 2A, 2B, 219 | 30600, 30750, 30491 | 18500 | 2.459,93 | 45.508.705,00 | Tela Geogrilla Mac Grid AR 5.7 | Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa y ofrecer resistencia a las fuerzas biaxiales |
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 12, Zona 3-2, Quepos. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°2 | 2011 | 34 | 60082 | 62709 | 3.250,16 | 203.815.554,10 | Geomalla biaxial de fibra de vidrio de 50kN | Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa |
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 9, Zona 4-1, Perez Zeledón. Licitación Pública N°2009LN-000003-CV, Orden de Servicio N°2 | 2014 | 2 | 10020 | 1620 | 1.146,32 | 1.857.038,40 | Geogrilla | Disminuir el reflejo de grietas en la sobrecapa |
| Conservación vial de la Red Vial Nacional Pavimentada por precios unitarios, Línea 2, Zona 5-1, Guápiles. Contratación Directa Autorizada N°2014LN-000140-0CV00, Orden de Servicio N°4 | 2015 | 32 | 70130, 70090 | 20000 | 2.939,20 | 58.781.000,00 | Geomalla biaxial de fibra de vidrio de 50kN | Recuperar la capacidad estructural de los tramos intervenidos y alargar la vida útil del proyecto |

Fuente: Picado, 2017

MACCAFERRI

# ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

*Rev. 01 ; Fecha 11.2014*

## MacTex®N

### Geotextil Notejido en Polipropileno

## Características Técnicas

MacTex® N es un geotextil agujado producido con hilos de polipropileno.

| MacTex® N | N 20.1 | N 24.1 | N 27.1 | N 28.1 | N 34.1 | N 47.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Color | Negro | | | | | |

| Propiedades físicas | | | N 20.1 | N 24.1 | N 27.1 | N 28.1 | N 34.1 | N 47.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gramaje | g/m² | ASTM D 5261 / ABNT NBR ISO 9864 | 105 | 120 | 140 | 140 | 170 | 237 |
| Espesor | mm | ASTM D 5199 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,5 | 1,9 |

| Propiedades mecánicas | | | N 20.1 | N 24.1 | N 27.1 | N 28.1 | N 34.1 | N 47.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistencia a la tracción tira ancha sentido longitudinal | kN/m | ASTM D 4595 / ABNT NBR ISO 10319 | 6 | 6,7 | 7,7 | 7,7 | 9,7 | 12,5 |
| Elongación Tira Ancha | % | ASTM D 4595 / ABNT NBR ISO 10319 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Resistencia a la tracción GRAB sentido longitudinal | kN | ASTM D 4632 | 0,35 | 0,4 | 0,445 | 0,453 | 0,734 | 0,8 |
| Elongación GRAB | % | ASTM D 4632 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Resistencia al punzonamiento CBR | kN | ASTM D 6241 / ABNT NBR 13359 | 0,76 | 1,18 | 1,32 | 1,24 | 1,8 | 2,11 |
| Resistencia al desgarre trapezoidal sentido longitudinal | kN | ASTM D 4533 | 0,13 | 0,19 | 0,22 | 0,20 | 0,3 | 0,33 |
| Punto de reblandecimiento | °C | | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |

| Propiedades hidráulicas | | | N 20.1 | N 24.1 | N 27.1 | N 28.1 | N 34.1 | N 47.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Permeabilidad normal | cm/s | ASTM D 4491 / ABNT NBR 15223 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,40 | 0,40 |
| Permitividad | $s^{-1}$ | ASTM D 4491 / ABNT NBR 15223 | 2,2 | 2,0 | 2,0 | - | 1,9 | 1,4 |

| Presentación del rollo | | N 20.1 | N 24.1 | N 27.1 | N 28.1 | N 34.1 | N 47.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Largo | m | 110 55 | 110 55 | 110 55 | 110 55 | 110 55 | 110 55 |
| Largura | m | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |

Los valores listados anteriormente corresponden a una media de resultados encontrados en ensayos realizados en laboratorios. En el momento de la producción, manipulación, almacenamiento y transporte, pueden cambiar algunos de estos resultados.

MACCAFERRI

# ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

*Rev. 00 ; Fecha 10.2014*

## MacTex®N

### Geotextil Notejido en Polipropileno

## Características Técnicas

MacTex® N es un geotextil agujado producido con hilos de polipropileno.

| MacTex® N | N 26.1 | N 30.1 | N 40.1 | N 47.1 | N 50.1 | N 70.1 | N 80.1 | N100.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Color | Negro | | | | | | | |

| Propiedades físicas | | | N 26.1 | N 30.1 | N 40.1 | N 47.1 | N 50.1 | N 70.1 | N 80.1 | N100.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gramaje | g/m² | ASTM D 5261 | 130 | 142 | 203 | 237 | 271 | 339 | 400 | 540 |
| Espesor | mm | ASTM D 5199 | 1 | 1,2 | 1,5 | 1,9 | 2 | 2,7 | 3,1 | 4,2 |

| Propiedades mecánicas | | | N 26.1 | N 30.1 | N 40.1 | N 47.1 | N 50.1 | N 70.1 | N 80.1 | N100.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistencia a la tracción tira ancha sentido longitudinal | kN/m | ASTM D 4595 / ABNT NBR 12824 | 7 | 8 | 11 | 12,5 | 14 | 18 | 25 | 29,7 |
| Elongación Tira Ancha | % | ASTM D 4595 / ABNT NBR 12824 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Resistencia a la tracción GRAB sentido longitudinal | N | ASTM D 4632 | 400 | 530 | 710 | 890 | 910 | 1110 | 1330 | 1690 |
| Elongación GRAB | % | ASTM D 4632 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Resistencia al punzonamiento CBR | kN | ASTM D 6241 / ABNT NBR 13359 | 1,22 | 1,46 | 1,82 | 2,11 | 2,38 | 3,11 | 3,78 | 4,82 |
| Resistencia al desgarre trapezoidal sentido longitudinal | N | ASTM D 4533 | 160 | 220 | 270 | 333 | 380 | 440 | 510 | 640 |
| Punto de reblandecimiento | °C | | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |

| Propiedades hidráulicas | | | N 26.1 | N 30.1 | N 40.1 | N 47.1 | N 50.1 | N 70.1 | N 80.1 | N100.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Permeabilidad normal | cm/s | ASTM D 4491 / ABNT NBR 15223 | 0,45 | 0,42 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| Permitividad | $s^{-1}$ | ASTM D 4491 / ABNT NBR 15223 | - | 1,7 | 1,5 | 1,4 | 1,35 | 1,3 | 1 | 0,7 |

| Presentación del rollo | | N 26.1 | N 30.1 | N 40.1 | N 47.1 | N 50.1 | N 70.1 | N 80.1 | N100.1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Largo | m | 110<br>55 | 110<br>55 | 110<br>55 | 110<br>55 | 110<br>55 | 110<br>55 | 110<br>55 | 110<br>55 |
| Largura | m | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |

Los valores listados anteriormente corresponden a una media de resultados encontrados en ensayos realizados en laboratorios. En el momento de la producción, manipulación, almacenamiento y transporte, pueden cambiar algunos de estos resultados.