

ESTUDIO DE GRILLAS POLIMÉRICAS EN SISTEMAS ANTI-REFLEJO DE FISURAS BAJO SOLICITACIONES DINÁMICAS

HÉCTOR LUIS DELBONO

Tesis presentada para aspirar al grado de
Doctor en Ingeniería, mención Materiales



Facultad Regional La Plata
Universidad Tecnológica Nacional

2014

*** Este trabajo se llevó a cabo en el LEMaC (Centro de Investigaciones Viales, Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional), bajo la dirección del Dr. Carlos Alberto Giudice.**

*** Se presenta a la consideración de las autoridades de la Universidad Tecnológica Nacional para aspirar al grado académico de Doctor en Ingeniería, mención Materiales.**

A G R A D E C I M I E N T O S

* Al **Dr. Carlos Alberto Giudice** por su inestimable y valiosa dirección.

* A la **Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional** por facilitar sus instalaciones y equipamiento.

* Al **personal del LEMaC (Centro de Investigaciones Viales, UTN-FRLP)**, particularmente a su Director Mg. Ing. Gerardo Botasso, por el apoyo y colaboración.

* A la **Universidad Tecnológica Nacional** y a la **Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica** (Beca de Posgrado para la formación de Doctores en Áreas Tecnológicas Prioritarias) por financiar este trabajo de tesis.

* **A Dios, a mi familia, a mi novia y amigos en general** que me ayudaron de manera directa e indirecta en la búsqueda del título de Doctor en Ingeniería, mención Materiales.

RESUMEN

Las solicitaciones producidas sobre los pavimentos, por cargas repetidas de vehículos y las condiciones ambientales, generan un deterioro continuo sobre la estructura, generando pérdidas de las propiedades mecánicas, ocasionando una pérdida estructural y funcional del camino.

Uno de los problemas más comunes y de difícil control actualmente debido a estas solicitaciones es la fisuración refleja, fenómeno por el cual se propagan las fisuras existentes en capas inferiores o en coincidencia con movimiento de juntas de un pavimento envejecido, hacia la nueva capa colocada como refuerzo, calcando la patología de las mismas.

En este sentido el Dr. Guillermo E. Montestruque presentó, en el XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (2009) realizado en Mar del Plata (provincia de Buenos Aires, Argentina), su trabajo titulado *“Crack activity meter” en la rehabilitación de pavimentos con grillas como sistema anti-reflejo*, en el que utilizó grillas en poliéster entre capas asfálticas para estudiar el fenómeno de la fisuración refleja.

Intrigado por la unión entre los materiales consulte sobre el tema al Dr. Montestruque, quien me comentó que la adherencia era una de las ramas pendientes en su investigación, lo que motivó conjuntamente el desarrollo de la presente Tesis Doctoral.

Siendo la grilla en poliéster, conocida internacionalmente como un material geosintético, una tecnología poco difundida en la Argentina y ampliamente utilizada en la restauración de pavimentos asfálticos mayormente, surge la incertidumbre de si estos tipos de materiales utilizados en la restauración de un pavimento de hormigón con refuerzo asfáltico, absorben el estado tensional que sufre el mismo y no generan un plano de discontinuidad mayor. Para lo cual el estudio de la adherencia es de fundamental importancia.

Teniendo fundamentación a partir de una profunda búsqueda bibliográfica, se busca comprender el funcionamiento de la estructura de un camino cuando se introducen materiales, de diferente composición polimérica y conformación estructural, estudiando la adherencia que se logra entre las mismas y el retardo de la propagación de una fisura hacia la superficie del camino.

Se destacan los ensayos implementados frente a la gran variación de técnicas de experimentación de numerosos centros de investigación de diferentes países.

La Tesis caracteriza todos los materiales intervinientes del sistema bajo estudio, analizando y valorando su comportamiento en forma conjunta mediante sistemas dinámicos de sollicitación con el objeto de estudiar el mecanismo de la fisuración refleja y la adherencia entre capas, que los geosintéticos manifiestan para alargar la vida útil de un pavimento con el consiguiente ahorro de mantenimiento, destacando que los mismos brindan soluciones que son técnica y/o económicamente ventajosas.

Finalmente, resulta oportuno mencionar que los materiales geosintéticos, utilizados en obras viales de Argentina no se producen en nuestro país, por lo que se realiza un profundo avance en la innovación de nuevos materiales a través de la producción científica, convenios y transferencias tecnológicas realizadas a través del LEMaC (Centro de Investigaciones Viales, UTN-FRLP), llegando a producir, caracterizar y poner en obra nuevos materiales que hacen a la problemática de la fisuración de los pavimentos.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

CAPÍTULO I. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	1
I.1 INTRODUCCIÓN	2
I.2 MARCO TEÓRICO Y JUSTIFICACIÓN	4
I.2.1 Fisuración refleja	4
I.2.1.1 Mecanismo de fisuración en pavimentos	5
I.2.1.2 Material geosintético como sistema anti-reflejo de fisuras	7
I.2.2 Adherencia entre capas de un pavimento	8
I.2.2.1 Material geosintético en la adherencia entre capas	8
I.2.3 Consideraciones particulares de estudio	9
I.3 ANTECEDENTES	11
I.3.1 Primeras intervenciones	11
I.3.2 Interrogantes sobre la problemática planteada	13
I.4 OBJETIVOS DE LA TESIS	14
I.4.1 Objetivo específico	14
I.4.2 Objetivos complementarios	14
I.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	15
I.6 REFERENCIAS	16
CAPÍTULO II. DETERIORO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN	21
II.1 INTRODUCCIÓN	22
II.2 DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS	24
II.2.1 Fallas sobre el pavimento de hormigón	25
II.2.1.1 Fisura transversal o diagonal	25
II.2.1.2 Fisura de esquina	26
II.2.1.3 Fisura longitudinal	26
II.2.1.4 Losas subdivididas o fragmentación en bloques	27
II.2.1.5 Levantamiento de losas o dislocamiento	28
II.2.2 Fallas por adherencia sobre la capa asfáltica	29
II.2.2.1 Falla por corrimiento	29
II.2.2.2 Falla tipo media luna o en arco	30
II.2.2.3 Falla tipo corrugación	31



II.3 PROPAGACIÓN DE FISURA EN PAVIMENTOS	32
II.3.1 Modo en que puede producirse la fisura	34
II.3.2 Mecanismo de reflexión de fisura	35
II.3.3 Capas intermedias como sistema anti-reflejo de fisuras	39
II.4 ADHERENCIA ENTRE CAPAS	41
II.4.1 Importancia y consecuencias	41
II.4.2 Adherencia en la interfase del sistema compuesto	44
II.5 REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS	47
II.5.1 Rehabilitación estructural	48
II.5.2 Rehabilitación superficial	48
II.5.3 Método para la determinación de una solución adecuada	49
II.6 DISEÑO DEL REFUERZO SOBRE PAVIMENTO DE HORMIGÓN	50
II.6.1 Modelos de diseño	50
II.6.2 Los geosintéticos como herramienta de proyecto	52
II.7 REFERENCIAS	54
CAPÍTULO III. EQUIPOS PARA ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LA INTERFASE	61
III.1 INTRODUCCIÓN	62
III.2 ENSAYOS PARA ESTUDIAR LA PROPAGACIÓN DE FISURAS	62
III.2.1 Ensayos de rueda de carga	63
III.2.1.1 Whell Tacking Test (WRC)	63
III.2.1.2 Provador Pavement Rutting (LCPC)	63
III.2.1.3 Hamburgo Whell Tracking Test Device (HSTD)	64
III.2.1.4 University College of Dublin (UCD)	65
III.2.1.5 Whell Tracking Test (WTT)	65
III.2.2 Ensayos de flexión con carga cíclica	66
III.2.2.1 Equipo de carga cíclica (ECC)	66
III.2.2.2 Equipo LRPC D' AUTUN	67
III.2.2.3 Equipo Test Set Up	68
III.2.2.4 Equipo de carga cíclica IMAE	69
III.2.2.5 Equipo MEFISTO	69
III.2.2.6 Equipo MTS (Aeronautical Technological Institute)	70



III.2.2.7 Equipo de carga cíclica LEMaC	70
III.3 ENSAYOS PARA ESTUDIAR LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS	71
III.3.1 Ensayos de corte entre capas	71
III.3.1.1 Prueba de adhesión de interfase ASTRA	72
III.3.1.2 Equipo de corte US/BELGE y Swiss LPDS Tester	72
III.3.1.3 Equipo Superpave Shear Test LTRC	73
III.3.1.4 Equipo de corte FDOT	74
III.3.1.5 Equipo de adherencia EZAB	74
III.3.1.6 Equipo de adherencia Slant Shear Test (SST)	75
III.3.1.7 Ensayo de corte WHEAT	75
III.3.1.8 Ensayo de corte Francesio	76
III.3.1.9 Ensayo de corte LCB	77
III.3.2 Ensayos de tracción directa	78
III.3.2.1 Ensayos de tracción directa DT	78
III.3.2.2 Ensayo de tracción ENDACMA	78
III.3.2.3 Ensayo de tracción IMAE	79
III.3.2.4 Ensayo de tracción LEMaC	80
III.4 REFERENCIAS	81
CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS	86
IV.1 INTRODUCCIÓN	87
IV.2 DEFINICIÓN	89
IV.3 CONSTITUYENTES	89
IV.3.1 Betún asfáltico	90
IV.3.2 Agua	90
IV.3.3 Agentes emulsificantes	91
IV.3.3.1 Emulsificantes aniónicos	92
IV.3.3.2 Emulsificantes catiónicos	93
IV.3.4 Polímero	95
IV.3.5 Otros componentes	96
IV.4 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS	97
IV.5 FABRICACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS	99



IV.6 EMULSIONES ASFÁLTICAS COMO RIEGO DE ADHERENCIA	102
IV.7 EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS	104
IV.7.1 Normativa actual sobre emulsiones modificadas	105
IV.7.2 Emulsiones consideradas en la investigación	106
IV.7.2.1 Emulsiones termo-adherentes	106
IV.7.2.2 Emulsiones de imprimación	107
IV.7.2.3 Emulsiones modificadas con polímero	108
IV.7.3 Emulsión seleccionada para la investigación	109
IV.7.3.1 Aspectos considerados para su selección	109
IV.7.3.2 Caracterización de la emulsión empleada	111
IV.8 COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN SOBRE EL HORMIGÓN	118
IV.8.1 Proceso de rotura	118
IV.8.2 Tensión superficial	119
IV.8.2.1 Tensión superficial de líquidos	120
IV.8.2.2 Tensión superficial de sólidos	123
IV.8.3 Humectancia	126
IV.8.3.1 Adhesión	126
IV.8.3.2 Penetración	127
IV.8.3.3 Propagación	129
IV.9 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	129
IV.9.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier	129
IV.9.2 Espectroscopia Electrónica de Barrido	131
IV.9.3 Ensayo de Potencial Zeta (Pz, estabilidad de la emulsión)	132
IV.9.4 Determinación de Potencial de Hidrogeno (pH)	134
IV.10 REFERENCIAS	135
CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS	140
V.1 DEFINICIÓN	141
V.2 FUNCIONES	141
V.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA	144
V.4 FIBRAS PARA GEOSINTÉTICOS	146
V.4.1 Fabricación de las fibras	148



V.4.1.1	Fabricación a partir del reciclaje	148
V.4.1.2	Fabricación a partir de la materia prima “polímero”	148
V.4.2	Morfología de las fibras	141
V.4.3	Propiedades de las fibras	152
V.4.3.1	Propiedades geométricas	152
V.4.3.1.1	Finura, masa lineal, masa volumétrica	153
V.4.3.1.2	Forma de la sección transversal	153
V.4.3.1.3	Comportamiento a tracción	154
V.4.3.2	Propiedades térmicas	155
V.4.3.2.1	Acción del calor	155
V.4.3.2.2	Termofijado	156
V.4.3.2.3	Fibras termoligantes	157
V.4.3.3	Acción de la intemperie	157
V.5	GEOSINTÉTICOS EN MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS	157
V.5.1	Materiales geosintéticos seleccionados para la investigación	159
V.5.2	Influencia de la temperatura	161
V.5.2.1	Ensayo de punto de fusión y ablandamiento	168
V.5.2.2	Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier	172
V.6	EXPERIENCIA CON GEOSINTÉTICOS	174
V.6.1	Técnicas de interposición	176
V.6.1.1	Localizada	177
V.6.1.2	Generalizada	177
V.6.2	Sistemas para prevención de fisuras reflejas	178
V.6.2.1	Sellado de fisuras tipo puente	178
V.6.2.2	Capa de arena-asfalto de 1,5 cm a 2,0 cm de espesor	179
V.6.2.3	Geotextil No Tejido embebido en asfalto	180
V.6.2.4	Geocompuesto tipo “sándwich” de geotextil tejido y membrana de asfalto modificado	180
V.6.2.5	Una capa de slurry-fibra	180
V.6.2.6	Capa mono granular	180
V.6.2.7	Geomallas, grillas o geogrillas	181
V.6.2.8	Malla de acero	181
V.6.2.9	Grilla de hilos de fibra de vidrio cubiertos con polímero elastomérico	181



V.6.3 Aplicación de geosintéticos; proceso constructivo	183
V.6.4 Geotextiles no tejidos embebidos en la restauración de pavimentos	185
V.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GEOSINTÉTICOS	188
V.7.1 Masa por unidad de área	188
V.7.2 Espesor a presiones prefijadas	190
V.7.3 Ensayo de tracción con probetas anchas	191
V.7.4 Ensayo por Espectroscopia Electrónica de Barrido	197
V.7.5 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier	199
V.7.5.1 Espectro FTIR para el material HSK PET	200
V.7.5.2 Espectro FTIR para fibras en polipropileno	201
V.7.5.3 Espectro FTIR para el material HSK PVA	202
V.7.5.4 Espectro FTIR para el material MAC PET	203
V.7.6 Caracterización de la membrana base del material FM PP y el material FM PP arena	204
V.8 REFERENCIAS	206
CAPÍTULO VI. CAPA ASFÁLTICA DE REFUERZO	212
VI.1 INTRODUCCIÓN	213
VI.2 COMPONENTES Y TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	215
VI.2.1 Materiales componentes de la mezcla asfáltica	215
VI.2.2 Tipos de mezclas asfálticas	217
VI.3 FISURAS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	220
VI.3.1 Propagación de fisuras por mecánica de la fractura	221
VI.3.2 Propiedades de la mezcla vinculadas con la fisuración	223
VI.3.2.1 Contenido de asfalto y espesor de recubrimiento	223
VI.3.2.2 Módulo de rigidez	224
VI.3.2.3 Contenido de vacíos	224
VI.3.2.4 Granulometría y tipo de agregado	224
VI.3.2.5 Consistencia y viscosidad del asfalto	225
VI.4 REFUERZO ASFÁLTICO SOBRE EL HORMIGÓN	225
VI.5 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA LA INVESTIGACIÓN	227



VI.5.1 Aspectos considerados	227
VI.5.2 Caracterización de la mezcla asfáltica	227
VI.6 REFERENCIAS	233
CAPÍTULO VII. DISEÑO DE LOS SISTEMAS, ENSAYOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	236
VII. 1 INTERPOSICIÓN DE GRILLAS POLIMÉRICAS ENTRE CAPAS DE UN PAVIMENTO	237
VII.1.1 Sistemas diseñados	237
VII.1.2 Análisis de la interfase	243
VII.2 REFLEJO DE FISURAS CON Y SIN LA INTERPOSICIÓN DE GRILLAS POLIMÉRICAS	248
VII.2.1 Modelo de reflejo de fisuras con equipo de rueda de carga Wheel Tracking Test (WTT)	248
VII.2.1.1 Confección de probeta	249
VII.2.1.2 Sistema de apoyo	256
VII.2.1.3 Procedimiento de ensayo	256
VII.2.1.3.1 Etapa 1, a temperatura de 60 °C	257
VII.2.1.3.2 Etapa 2, a temperatura de 25 °C	257
VII.2.1.4 Resultados sin interposición de geosintético	257
VII.2.1.4.1 Etapa 1, ensayo a 60 °C	257
VII.2.1.4.1.1 Curva de ahuellamiento sobre base de hormigón a 60 °C	257
VII.2.1.4.2 Etapa 2, ensayo a 25 °C	262
VII.2.1.5 Resultados con interposición de geosintético	262
VII.2.1.5.1 Etapa 1, ensayo a 60 °C	262
VII.2.1.5.2 Etapa 2, ensayo a 25 °C	265
VII.2.1.6 Análisis comparativo a diferente temperatura sobre base de hormigón	269
VII.2.1.7 Ensayo a 60 °C, sobre una base asfáltica	272
VII.2.1.8 Análisis del ensayo de rueda de carga	275
VII.2.2 Modelo de reflejo de fisura con equipo de cargas cíclicas (MR) LEMaC	279



VII.2.2.1	Confección de probetas	280
VII.2.2.2	Sistema de apoyo	280
VII.2.2.3	Procedimiento de ensayo	281
VII.2.2.4	Resultados a flexión	282
VII.2.2.5	Resultados por corte	286
VII.2.2.6	Análisis del ensayo de módulo de rigidez	293
VII.3	ADHERENCIA ENTRE CAPAS CON Y SIN LA	
	INTERPOSICIÓN DE GRILLAS POLIMÉRICAS	296
VII.3.1	Adherencia mediante ensayo de corte LCB	297
VII.3.1.1	Confección de probetas	299
VII.3.1.2	Secuencia de moldeo	299
VII.3.1.2.1	Moldeo de la probeta de referencia	301
VII.3.1.2.2	Moldeo de la probeta sobre base de hormigón	301
VII.3.1.3	Procedimiento de ensayo	302
VII.3.1.4	Resultados sobre base de hormigón	303
VII.3.1.4.1	Modelo sin geosintético	304
VII.3.1.4.2	Modelo con geosintético	306
VII.3.1.5	Resultados sobre base asfáltica	313
VII.3.1.6	Ensayos de adherencia para diferente abertura de malla	318
VII.3.1.6.1	Confección de probetas	318
VII.3.1.6.2	Procedimiento de ensayo	319
VII.3.1.6.3	Resultados	320
VII.3.1.6	Análisis de adherencia por corte	324
VII.3.2	Adherencia mediante ensayo de tracción directa LEMaC	329
VII.3.2.1	Confección de probetas	329
VII.3.2.2	Procedimiento de ensayo	329
VII.3.2.3	Resultados para sistemas sin geosintético	330
VII.3.2.4	Resultados para sistemas con geosintético	331
VII.3.2.5	Resultados sobre base asfáltica	337
VII.3.2.6	Análisis del ensayo a tracción directa LEMaC	340
VII.4	Análisis de la adherencia entre capas	343

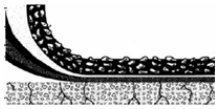


CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES	346
VIII.1 CONSIDERACIONES GENERALES	347
VIII.2 OTRAS CONSIDERACIONES	347
VIII.3 SOBRE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA	349
VIII.4 SOBRE LOS MATERIALES GEOSINTÉTICOS	350
VIII.4.1 Comportamiento frente a la temperatura	351
VIII.4.2 Posición dentro de la estructura	353
VIII.4.3 Geometría de la fibra	353
VIII.4.4 Espesor del material	354
VIII.5 SOBRE PROPAGACIÓN DE FISURAS EN PAVIMENTOS	354
VIII.5.1.1 Ensayo de la rueda de carga (WTT)	355
VIII.5.1.2 Ensayo de carga cíclica (MR)	357
VIII.6 SOBRE LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS	359
VIII.6.1 Ensayo de adherencia por corte	360
VIII.6.2 Ensayo de adherencia por tracción directa	362
VIII.7 CONCLUSIONES FINALES	363
VIII.8 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	371

ANEXO I. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES	1
A1. REHABILITACIÓN AVENIDA LEOPOLDO LUGONES (BS. AS.)	1
A1.1 Descripción de la obra	1
A1.2 Proceso constructivo	1
A1.3 Resultados	3
A2. ENSANCHE DE LA AVENIDA 60 ENTRE CALLE 7 Y 12 DE LA CIUDAD DE LA PLATA	3
A2.1 Descripción de la obra	4
A2.2 Proceso constructivo	5
A2.3 Resultados	6
A3. REHABILITACIÓN AUTOPISTA VESPUCIO NORTE (CHILE)	9
A3.1 Descripción de la obra	9
A3.2 Confección de probetas	9



A3.3 Resultados obtenidos	10
A4. REHABILITACIÓN Y ENSANCHE DE ACCESO A SAN NICOLAS	14
A4.1 Descripción de la obra	14
A4.2 Descripción del trabajo	15
A4.3 Resultados	16
<hr/>	
ANEXO II. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	18
<hr/>	
1. PUBLICACIONES	18
2. INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA	21
3. CUADERNOS	22
4. CAPACITACIÓN	23
5. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS	26

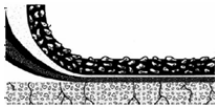


CAPÍTULO I

PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Este Capítulo introduce al lector dentro de la problemática de los pavimentos en cuanto al fenómeno de fisuración refleja y la adherencia entre capas, presentando las primeras intervenciones realizadas sobre este tema.

Se brinda una breve descripción del sistema multicapa a estudiar y los ensayos implementados, se plantean los interrogantes y se presentan los objetivos a encarar para lograr evacuar las dudas sobre la introducción de los materiales geosintéticos entre capas de un pavimento.



I.1 INTRODUCCIÓN

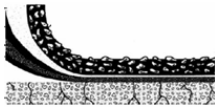
El desarrollo económico y social de un país, sin duda, está estrechamente relacionado con un buen sistema de transporte. [1] KEANE [1996] señala que las inversiones en redes de caminos tienen impacto directo a nivel macro y micro económico en la productividad de una región.

Otros autores [2] TAMANES [2003] e [3] IBARROLA [2008] destacan que la inversión en construcción y mantenimiento de caminos es una herramienta de crecimiento económico. Un peso invertido en tiempo y forma en mantenimiento preventivo, redundara en varios pesos ahorrados en reconstrucción técnica y económicamente muy dificultosa.

Indudablemente el mantenimiento o conservación de los pavimentos garantiza la inversión inicial de la construcción, disminuye el costo de explotación y alarga la vida tanto del camino como de los vehículos que lo utilizan [4] DAVIES R. y SORENSON J. [2000]. Más que una solución de economía, es una solución de alta técnica de ingeniería y por lo tanto los trabajos deben efectuarse oportunamente ya que de ello depende que los gastos que se realicen sean mínimos.

Uno de los problemas más comunes en la restauración de los pavimentos son las fisuras u otros tipos de fallas en la superficie, las que parecen ser invisibles en etapas tempranas, pero que pueden desarrollarse en defectos severos ocasionando grandes costos en términos de tiempo, dinero y trabajo [5] [PESHKIN D. G. 2004].

Las fisuras pueden solo afectar la apariencia de una estructura, pero también puede deberse a fallas estructurales significativas. En este sentido el reflejo de fisuras es una de las principales preocupaciones de organismos viales y el de mayor preocupación dentro de la ingeniería de pavimentos actualmente [6] [ELSEFI et al., 2003].



La solución tradicional al problema de las fisuras en los pavimentos, sean de hormigón o asfálticos, era aplicar una capa de refuerzo asfáltico de cierto espesor hasta que; con la crisis del petróleo en 1970, ha sido necesario buscar otras alternativas, dando origen así a la aparición de los materiales geosintéticos (materiales producidos por polímeros sintéticos o naturales), los cuales se incorporan al paquete estructural con la intención de colaborar con los esfuerzos externos, entre otras funciones [7] [UTN-INTI 2003]. Fue así que estos materiales surgieron y crecieron en el campo de la ingeniería vial.

Autores como [8] [FRANCESIO C., 1969]; [9] [RODRIGUEZ M., 1991]; [10] [VARGAS SAA P., 2008]; [11] [MONTESTRUQUE G., 2009]; [12] [RICCI L., 2011], entre otros, han desarrollado equipos para estudiar la propagación de fisuras y la adherencia entre capas asfálticas, analizando inicialmente el comportamiento de las emulsiones asfálticas, modificando la dotación y tipo de riego de liga.

Un pavimento, al cual podemos definir como sistema multicapa (paquete estructural del camino formado por capas de diferentes espesores y materiales) debe actuar solidariamente, para lo cual la relación íntima entre sus componentes es de fundamental importancia, permitiendo que las solicitaciones generadas por el tránsito y las climáticas sean disipadas en el sistema y no a través del comportamiento individual de cada capa [13] [TSCHEGG et al., 1995].

Por lo expuesto, la presente tesis doctoral busca estudiar el *mecanismo de propagación de fisuración refleja* en un sistema compuesto, en especial *la adherencia en la interfase* entre los materiales componentes del sistema, al interponer materiales poliméricos de distinta conformación y composición química, utilizados en la rehabilitación de pavimentos rígidos con refuerzo asfáltico, mediante el trabajo de una emulsión asfáltica modificada con polímero del tipo SBS como agente responsable de la transferencia de esfuerzos entre los materiales.



El sistema a estudiar está conformado por una losa de hormigón (Concreto hidráulico de Cemento Portland), una emulsión modificada con polímero SBS como agente de adhesión (ECRR-M), un material geosintético y una carpeta asfáltica densa convencional tipo CAC D20 utilizada como refuerzo. Se busca cuantificar el comportamiento de los materiales geosintéticos, para lo cual se toma como referencia el sistema descrito, sin material geosintético intermedio entre capas, estudiándose el comportamiento del sistema mediante sollicitaciones dinámicas.

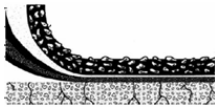
Para lograr el objetivo fue imprescindible analizar y valorar el comportamiento de la interfase, donde entran en comunión distintos materiales con propiedades físicas y químicas diferentes. Para ello se realiza la caracterización completa de cada material interviniente en la matriz, realizándose ensayos de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X (EDAX).

Se diseña el hormigón y la mezcla asfáltica teniendo en cuenta factores como disposición de materiales, exigencias de especificación para pavimentos de alto niveles de tránsito, etc. Se seleccionan como punto de partida diferentes emulsiones asfálticas con objeto de utilizar la más conveniente, caracterizándose bajo normativa IRAM y analizando su comportamiento mediante distintas técnicas como tensión superficial, ángulo de contacto, viscosidad, entre otras. Se realizan ensayos, mediante equipos de sollicitación dinámica implementados para tal fin.

I.2 MARCO TEÓRICO Y JUSTIFICACIÓN

I.2.1 Fisuración refleja

Se denomina como fisuración refleja al fenómeno por el cual se propagan las fisuras pre existentes en capas inferiores o en coincidencia con movimiento de juntas de un pavimento envejecido, hacia la nueva capa



colocada como refuerzo, por efecto del tránsito y/o de las sollicitaciones medioambientales calcando la patología de las mismas. [11] [MONTESTRUQUE G. E., 2009]; [14] [LYTTON R. L. 1989]; [15] [KIM J., BUTLLAR W. G. 2002; [16] [VIRGILI et al., 2009]; [17] [BAEK et al., 2010]. Este fenómeno es uno de los problemas más serios de deterioro de pavimentos en todo el mundo, mereciendo el asunto especial cuidado en los diseños de mantenimiento como de obras nuevas.

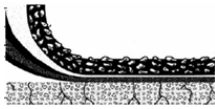
La reflexión de una fisura a la capa superior esta ligada al hecho que, bajo el efecto de sollicitaciones diversas, los bordes de la fisura existente se mueven creando concentración de tensiones y transfieren ese movimiento a la capa superior; por fatiga de la capa de refuerzo asfáltico se inicia una fisura que crece rápidamente en dirección a la superficie [18] [LAERTE MARONI G., 1993].

La problemática planteada puede encontrarse, además de los autores citados anteriormente, en los trabajos de [19] [SOUSA et al., 2001]; [20] [CLEVELAND G. et al., 2002]; [21] [KHODAII A. y FALLAH Sh., 2009]; [22] [NORMAN R., 2009].

I.2.1.1 Mecanismo de fisuración en pavimentos

La fisuración temprana de la nueva capa, colocada como refuerzo, es causada por la incapacidad de resistir los movimientos de la capa subyacente, que puede ser originada por diferentes mecanismos; así, por ejemplo, por las cargas del tránsito que generan deflexiones diferenciales, por expansión o contracción de la antigua capa o hasta por la propia carpeta asfáltica debido a los cambios térmicos [23] [MOLENAAR A.1993].

Estos efectos o movimientos originan tensiones de tracción en la fibra inferior o corte en la capa de refuerzo que pueden ser elevadas, tornándose mayores a las admisibles de corte y tracción del concreto



asfáltico, causando el surgimiento de la fisura en la capa de refuerzo [24] [VANELSTRAETE et al., 2005], Figura I.1.

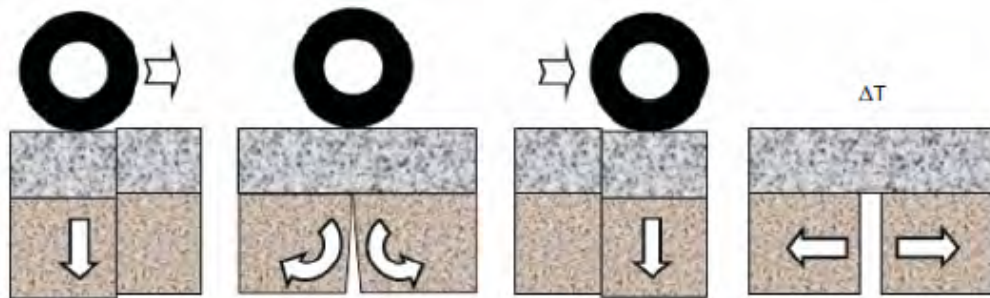


Figura I.1. Solicitaciones en la estructura del pavimento

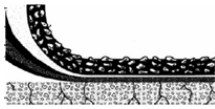
Fuente: [24] [VANELSTRAETE et al., 2005]

La ocurrencia y la forma de este tipo de fisuración es una de las principales causas de deterioro y disminución de la resistencia estructural del pavimento, llegando a poder ingresar el agua de lluvia a la estructura acelerando el proceso de deterioro (fenómeno conocido como bombeo de finos) [25] [ALBAIDI I., HOARE D. 1994].

Existen otras variables que intervienen en el proceso de la fisuración refleja, las cuales según [26] [DEL VAL MELUS M. A., 1996] pueden ser:

- Característica de la mezcla asfáltica de refuerzo, granulometría, contenido de ligante, relación betún/vacíos.
- Condiciones de las interfases pavimento/refuerzo.
- Espesor del pavimento/refuerzo.
- Condiciones climáticas durante la ejecución de las capas (temperatura, humedad, etc.).

De acuerdo a lo anterior, una fisura refleja puede producirse al cabo de unos años o unos pocos meses pudiendo generar el mismo problema en la capa que se pretende restaurar [27] [MONTESTRUQUE G. E., 2002].



I.2.1.2 Material geosintético como sistema anti-reflejo de fisuras

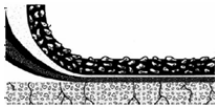
Los materiales geosintéticos vienen utilizándose como refuerzo en los pavimentos asfálticos, proporcionando resistencia a la tracción dentro del mismo, trabajando en colaboración con la mezcla asfáltica, pudiendo llegar a complementar las propiedades de ésta, minimizando la formación y desarrollo de fisuras causadas por la deformación progresiva de la estructura [11] [MONTESTRUQUE G. E., 2009]. Sin embargo, se continúan encontrando obras viales donde la falla por fisuración refleja se sigue dando al cabo de un corto lapso, aún cuando estos materiales han sido utilizados.

Los niveles de deformación del pavimento son relativamente bajos en condiciones de servicio, [28] [SOUZA N. C., SOUZA BUENO B. 2011], por ello los materiales deben trabajar efectivamente en bajas deformaciones.

Los fabricantes de geosintéticos comúnmente publican el control de calidad de sus productos, a pesar que no siempre describen características específicas aplicables al diseño. Por lo tanto, es necesario tener conocimiento de las características de fuerza-alargamiento de cada material cuando se lo emplea como sistema anti-reflejo.

En este sentido se realizan ensayos de tracción sobre los materiales geosintéticos, ejecutando los ensayos antes y después de someterlos a las temperaturas de uso que deben afrontar en obra.

Buscando responder a la problemática de la propagación de fisuras, con y sin la interposición de materiales geosintéticos, se implementan equipos de sollicitación dinámica tales como: rueda de carga Wheel Tracking Test (WTT) y de cargas cíclicas denominado Módulo de Rigidez (MR) para observar el fenómeno de la propagación de fisura, desde el inicio de la misma hasta su surgimiento en la superficie. Estos equipos son implementados y acondicionados en el Centro de Investigaciones Viales (LEMaC) de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata.



I.2.2 Adherencia entre capas de un pavimento

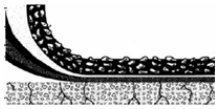
Los pavimentos basan su comportamiento en la capacidad de deformación ante la solicitación de las cargas del tránsito y las cargas térmicas [29] [CORDO OSCAR, 1994]. Para absorber tales cargas los pavimentos se constituyen en varias capas, las cuales poseen propiedades resistentes diferentes, disminuyendo su calidad a medida que aumenta la profundidad dentro del paquete estructural.

Los movimientos relativos entre esas capas son un origen importante de fisuras. Cuando la adherencia entre ellas no es satisfactoria, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana ante las solicitaciones externas [18] [LAERTE MARONI G., 1993]. Esta falta de vínculo se traduce también en una mala o nula distribución de tensiones en el espesor total del pavimento.

La problemática de la falta de adherencia radica fundamentalmente en una disminución significativa del momento de inercia con respecto a un pavimento con buena adherencia entre sus capas, lo que causa la disminución de la rigidez, de la capacidad estructural y en un aumento de las deflexiones observables [30] [CAMPANA J.; ROZADA B., 2004].

I.2.2.1 Material geosintético en la adherencia entre capas

La introducción de los materiales geosintéticos entre las capas de un pavimento no se realiza con el objeto de mejorar la adherencia entre capas sino de absorber las tensiones generadas por las cargas externas en el extremo de una fisura, la que eventualmente se propaga a través de la nueva capa colocada como refuerzo. No obstante ello, el fenómeno debe ser considerado ya que supone una discontinuidad en la interfase del sistema. Por ello, el material geosintético (GST) tiene cierto efecto o defecto en la mejora de la adherencia al interponerlos entre materiales de distinta naturaleza como ser una capa de Concreto de Cemento Portland (CCP) y la capa de Concreto Asfáltico (CA).



La adherencia entre capas asfálticas ha sido ampliamente estudiada [31] [RAAB C., 2004]; [32] [TOSTISCARELLI J., 2004]; [33] [ALVAREZ CALISTO, 2007]; [34] [RICCI et al., 2007]; [35] [FERNANDEZ COBO M., SOTO SANCHEZ J. A. 2008]; [36] [ZAMORA BARRAZA D. et al., 2010] entre otros de conocidos renombres dentro del ámbito vial, buscando analizar el comportamiento de diferentes tipos de riegos de adherencia.

Existen pocos trabajos que analizan el efecto de la adherencia entre capas con la inclusión de materiales geosintéticos entre ellas. En esta línea solo los Geotextiles No Tejidos y entre capas asfálticas son los considerados [12] [RICCI L., 2011]; abocándose a determinar el contenido óptimo de ligante a colocar, sin considerar su comportamiento cuando son colocados sobre una emulsión asfáltica modificada y las consecuencias de ser sometidos a la colocación y compactación de una capa asfáltica a temperaturas que sobrepasan los 140 °C.

Asimismo no hay acuerdo entre los distintos investigadores en cuál de todos los modelos disponibles resulta conveniente utilizar para evaluar efectivamente la adherencia entre capas, ni los límites tolerables que consideren una buena o mala adherencia.

Para desarrollar el estudio de la adherencia al interponer un material geosintético entre dos capas de diferentes características, se utilizan dos métodos de ensayo: el ensayo de corte por flexión LCB, desarrollado por el Laboratorio de Caminos de Barcelona de la Universidad de Cataluña, España, y el ensayo a tracción directa desarrollado en el LEMaC utilizando la máquina de tracción EMIC DL 10000. Estos ensayos son implementados en el Centro de Investigaciones Viales (LEMaC) de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata.

1.2.3 Consideraciones particulares de estudio

La medida de las fuerzas de atracción en una interfase sólido-sólido es difícil de determinar. En vista de lo cual se desarrollan técnicas de medida



de la adherencia a través de la determinación de valores de resistencia a la tracción y al corte de la unión.

Estos métodos son adecuados desde el punto de vista ingenieril porque proveen información sobre el comportamiento del sistema aunque químicamente no representen una medida directa de la fuerza de atracción entre superficies.

Al colocar un material geosintético entre capas que conforman un pavimento, conjeturamos que se genera una discontinuidad que puede favorecer o perjudicar la adherencia que se pretende alcanzar, según el tipo de material seleccionado y su forma de aplicación.

Generalmente se utilizan emulsiones asfálticas (convencionales o modificadas) de secado rápido para ligar las capas de un pavimento, por lo que resulta importante tener presente la humedad de la capa existente, lo que puede perjudicar la adherencia con el material geosintético y la capa de refuerzo. En este sentido se realizan estudios de la humectabilidad de la emulsión sobre el hormigón mediante la determinación del ángulo de contacto (etapas de adhesión, penetración y propagación) y de la viscosidad a diferentes temperaturas.

Otro efecto fundamental es la temperatura de la mezcla asfáltica cuando se la coloca y compacta (usualmente entre 140 °C y 160 °C) sobre materiales a partir de fibras poliméricas. Esta variable juega un rol esencial en ciertos tipos de geosintéticos según el polímero utilizado en su producción ya que puede modificar sus propiedades y estructura; ello, por lo tanto, puede alterar la adherencia del sistema y por ende el fenómeno de propagación de fisuras.

En torno a los estudios planteados se diseñaron nuevos materiales, mediante convenios con empresas extranjeras y transferencia tecnológica realizada con el sector privado nacional, buscando cubrir la necesidad de la problemática de los pavimentos deteriorados.



Esto es de significativa importancia debido a que los materiales actualmente son importados, y dado que en las obras viales de nuestro país se promueve la compra de materiales nacionales, mediante la Ley 25.551 “Compre Trabajo Argentino”, lo cual es un camino hacia el crecimiento tecnológico de nuestro país.

I.3 ANTECEDENTES

I.3.1 Primeras intervenciones

Generalmente para recuperar un pavimento fisurado, éste se cubre con una capa de mezcla asfáltica en caliente, de cierto espesor y características, previa limpieza y reparación de las fisuras existentes. Esto no genera una solución duradera ya que los esfuerzos continúan actuando en los bordes de la fisura, propagándose a la superficie rápidamente.

En las últimas décadas, numerosas investigaciones vienen siendo desarrolladas sobre este fenómeno pudiendo ser controlado o retardado por medio de procesos conocidos internacionalmente como S.A.M. (Stress Absorber Membrane) que consiste en una capa especial que queda como capa de rodadura, o S.A.M.I. (Stress Absorber Membrane Interlayer) [37] [AI-QADI I., 2004], que consiste en la interposición de una capa intermedia de características especiales, entre el pavimento antiguo y la nueva capa de refuerzo.

En la terminología anglosajona se conoce como S.A.M.I. a los sistemas de interposición de pequeño espesor, utilizadas para disminuir la tensión producida por la existencia de fisuras en las capas inferiores y los movimientos que ocasionan [38] [BARDASI A. et al., 1995].

En tal sentido, los geotextiles, las geogrillas y geocompuestos, materiales comprendidos dentro de los llamados geosintéticos, vienen teniendo buena respuesta en cuanto al retardo de la fisuración refleja, dependiendo



de la magnitud del problema ya que pueden y deben tomarse como válidas otras alternativas a saber:

- Sellado de las fisuras;
- Reciclado de las capas fisuradas;
- Trituración de la capa deteriorada (trituration de losas);
- Capa de nivelación de arena-asfalto a lo largo de toda la superficie;
- Mezclas modificadas con polímeros, con alta resistencia a la fatiga;
- Sistema S.A.M. (“Stress Absorber Membrane”), modificación del betón con caucho utilizadas en sellos de “Spray” (“seal coats”) generando una membrana impermeable;
- Sistemas S.A.M.I. (“Stress Absorber Membrane Interlayer”), membrana absorbente de tensiones entre capas que consiste en la construcción de una capa intermedia, de características especiales, entre el pavimento existente y la nueva capa de refuerzo.

La capacidad de cualquiera de los sistemas mencionados, colocado entre capas para reducir los esfuerzos de tensión, se incrementa a medida que el grosor aumenta al igual que su contenido de ligante, mejorándose la flexibilidad [39] [NAVAS A. et al., 2006]. Sin embargo, tener un sistema de absorción de esfuerzo entre capas, espesa, rica y altamente flexible, puede causar ahuellamiento y problemas de deformación bajo tránsito pesado.

Actualmente es difícil establecer cuál es, en mayor o menor medida, la eficacia de los diferentes sistemas. Sin duda, ello es debido a la casuística de la fisuración que es muy compleja, en función de su origen y evolución, así como de las condiciones externas de tránsito, las condiciones medioambientales y de los materiales componentes de los pavimentos.



I.3.2 Interrogantes sobre la problemática planteada

El estudio de los riegos asfálticos viene en constante desarrollo para lograr la adherencia necesaria entre las capas con objeto de mejorar distintas variables y problemáticas, llevando a que el comportamiento de la estructura del pavimento no sea sólo derivado del comportamiento individual de cada capa constituyente sino del sistema compuesto.

Para el cumplimiento de los materiales geosintéticos como sistema anti-reflejo de fisura, es indispensable su unión a las capas en las que está inmerso.

En base a lo expuesto es que surgen los siguientes interrogantes que se tratarán de evacuar durante el desarrollo de la investigación:

¿Qué fenómenos, en un pavimento rígido, pueden generar que una fisura se refleje sobre la capa que se coloca como refuerzo?

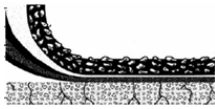
¿Qué consecuencias desfavorables tiene la reflexión de fisuras en la superficie de un pavimento asfáltico y porque interesa evitarla?

¿Como se comporta el paquete estructural al interponer, entre las capas, un material geosintético?

¿Entre qué capas se comporta mejor el material geosintético en cuanto al retardo de la fisuración refleja? ¿y en cuánto a la adherencia?

¿Influye la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en caliente sobre los materiales geosintéticos?

¿Es necesaria una capa asfáltica de nivelación sobre el pavimento de hormigón previo a la colocación de un material geosintético?



¿La incorporación de un material geosintético en el paquete estructural de un pavimento, influye en la adherencia entre capas? ¿De que manera?

¿Existe la posibilidad de optimizar la adherencia de un paquete estructural cuando en él se incorpora un geosintético?

¿Qué sucede en la interfase del sistema al utilizar emulsiones asfálticas modificadas con polímero en contacto con materiales geosintéticos?

I.4 OBJETIVOS DE LA TESIS

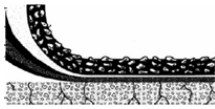
Considerando la problemática planteada, en la presente tesis doctoral se propone:

I.4.1 Objetivo específico

En los procesos de rehabilitación de pavimentos rígidos con pavimentos flexibles, estudiar la adherencia en la interfase del sistema multicapa, analizar el comportamiento del sistema compuesto mediante ensayos de sollicitación dinámica y, evaluar el fenómeno de propagación de fisura cuando se interponen grillas poliméricas de distinta naturaleza química y conformación estructural.

I.4.2 Objetivos complementarios

- Desarrollar una síntesis del problema de deterioro de los pavimentos de hormigón en cuanto al problema de fisuración refleja con refuerzo asfáltico, analizando diferentes técnicas llevadas a cabo en la actualidad.
- Diseñar la matriz del sistema (probeta), caracterizar los materiales intervinientes, analizar los esfuerzos de tensión y deformación de los materiales geosintéticos, verificando su comportamiento frente a las condiciones de uso que debe soportar.



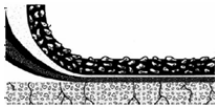
- Desarrollar e implementar equipos de sollicitación dinámica que representen los esfuerzos a los que está sometido el sistema, cuantificando las propiedades de los materiales intervinientes cuando se desea rehabilitar pavimentos de hormigón deteriorados.

- Contribuir con los métodos de proyecto de restauración, utilizando materiales geosintéticos como sistemas anti-reflejo de fisuras, mediante ensayos de laboratorio, asociados a la ejecución de aplicaciones en obra.

- Presentar los modelos obtenidos a tal fin ante en el Subcomité de Geosintéticos de I.R.A.M. (Instituto Argentino de Normalización y Certificación de Materiales) de la Argentina, con el objeto de que se constituya en norma y tener una herramienta para el proceso constructivo y control en obra.

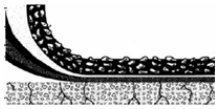
I.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para lograr los objetivos propuestos se realiza una profunda revisión bibliográfica de los estudios teóricos, de laboratorio y de campo realizados sobre el fenómeno de reflejo de fisura y adherencia entre capas, analizando otras alternativas de solución. Para ello el trabajo de investigación se divide en varios capítulos que permiten al lector conocer las propiedades de los materiales que conforman el sistema en estudio, los materiales existentes y desarrollados durante la tesis y realizar un análisis simple de la solución más conveniente para afrontar la problemática planteada.

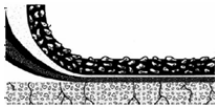


I.6 REFERENCIAS

- [1] Keane Thomas P. [1996]. The economic importance of the national Highway System. Public Road, Vol. 59. N°4. United States Department of Transportation - Administración Federal de Carreteras.
- [2] Tamames R. [2003]. Una Visión Global desde La Economía Ecológica: Desarrollo Sostenido y Desarrollo Sostenible, La Nueva Cultura de Las Carreteras. Asociación Española de la Carretera, 13-33.
- [3] Ibarrola H. [2008]. La Importancia de la Infraestructura Carretera en el Desarrollo Económico de un País. Revista Rutas, N° 127, 2-3.
- [4] Davies Robert M.; Sorensom Jim [2000]. Insights into Pavement preservation. Federal Highway Administration. Washintong DC. 26 p.
- [5] Peshkin, D. G.; Hoerner T. E.; Smith K. D.; Bruinsma J. E. and Seeds S. B. [2004]. Pavement Preservation: Design and Construction of Quality Preventive Maintenance Treatments, NHI Course 131103, FHWA-NHI-04-171. Reference Manual, National Highway Institute, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [6] Elseifi, M., and Al-Qadi, I. [2003]. Un Modelo Simplificado Anti-Reflejo de Grietas. Documento N° 03-3285 presentado en el Transportation Research Board 82, Washington, D.C.
- [7] UTN LEMaC; INTI-CIT [2003]. Geosintéticos. Desde la fabricación a su aplicación en obra. ISBN 950-42-0043-5. 338 p.
- [8] Francesio Carlos [1969]. La adherencia entre capas de pavimentos flexibles. XVI Reunión del asfalto. Comisión permanente del asfalto (CPA). Argentina.



- [9] Rodriguez R. M. [1991]. Estudio Do trincamento dos Pavimentos. Tese DSc. COPPE /URFJ. Brasil.
- [10] Vargas Saa Patricio Alejandro [2008]. Estudio experimental de soluciones de construcción para asegurar la adherencia entre capas asfálticas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de ingeniería civil. Chile.
- [11] Montestruque G. E. [2009]. “Crack Activity Meter” en la rehabilitación de pavimentos con grillas como sistema anti-reflejo. Conferencia técnica. VX Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Mar Del Plata. Buenos Aires. Argentina.
- [12] Ricci Luis A. [2011]. Evaluación de la adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético. Tesis de magíster en Ingeniería del Transporte, orientación vial. Facultad de Ingeniería. Universidad de Bs. As. (FIUBA). Argentina.
- [13] Tschegg, E.K.; Kroyer G.; Tan D-M; Stanzi-Tschegg S.E. and Litzka J. [1995]. Investigation of Bonding between Asphalt Layers on Road Construction, Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, N° 4, American Society of Civil Engineers, New York, New York, pp. 309-316
- [14] Kim J.; Butllar W.G. [2002]. Analysis of reflective crack control system involving reinforcing grid over base-isolating interlayer mixture Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, pp. 375–384
- [15] Lytton R. L. [1989]. Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete Geotextiles and Geomembranes, Vol. 8, pp. 217–237
- [16] Virgili A.; Canestrari F.; Grilli A.; Santagata F. A. [2009]. Repeated load test on bituminous systems reinforced with geosynthetics Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27, pp. 187–195



[17] Baek J.; Al-Qadi I. L.; Buttlar W. G. [2010]. Effect of Field Condition Parameters on the Performance of Geosynthetic Based Interlayer Systems Used to Control Reflective Cracking in Hot-Mix Asphalt Overlays. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1473–1476

[18] Laerte Guia Maroni [1993]. El uso de geotextiles en repavimentación asfáltica. Una experiencia reciente. Revista carreteras N°140. Argentina.

[19] Sousa, J.; Pais, J.; Saim, R.; Way, G.; and Stubstad, R. [2001]. Desarrollo de un modelo de diseño de sobrecapa mecánico basados en los principios de reflejo de grietas. Asociación de Productores de Asfalto Modificado con Caucho.

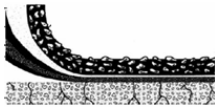
[20] Cleveland Gregory S. et al, [2002]. Geosynthetic in flexible and rigid pavement overlay system to reduce reflection cracking. Report 1777-1. Texas Department of Transportation Institute.

[21] Khodaii A. y Fallah Sh. [2009]. Effect of geosynthetic reinforcement on the propagation reflection cracking in asphalt overlays. Vol 7, N°2, 131-140. Department of Engineerin, Amirkabir University of technology. Theram, Irán.

[22] Norman R. [2009]. Extending pavement life by forestalling crack reflection. Chapter 4. Paper 24, 219-226. California, USA.

[23] Molenaar A.A.A. [1993]. Evaluation of pavement Structure with emphasis on reflective cracking. Second international conference on reflective cracking in pavement, RILEM Liege Belgium, 21-48.

[24] Valnestraete A., Francken L. and Bondt H. [2005]. Prevention of Reflective Cracking in Pavements. Modelling and structural desing of



overlay system. 77-90. RILEM Report18. Published in 1997 by E & FN Spon, 2–6 Boundary Row, London SE1 8HN. ISBN 0-419-22950-7.

[25] Alobaidi I. and Hoare D. [1994]. Factors affecting the pumping of fines at the subgrade interfase of highway pavement: A laboratory study. Technical paper N° 5 Geosynthetic International. Vol. 1 N° 2. pp. 221-259.

[26] Del Val Melús, Miguel Ángel [1996]. Capas anti-reflexión de grietas. Las Palmas de Gran Canaria. España.

[27] Montestruque G. E. [2002]. Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geosintéticos em sistemas anti-reflexão de trincas. Tese de doutoral. Campos Montenegro. São José Dos Campos, San Pablo, Brasil.

[28] Souza Natalia C. y Souza Bueno Benedito [2011]. Efecto de la impregnación bituminosa en geotextil no tejido a la tracción y propiedades de permeabilidad. Geotextiles y Geomembranas. Vol 29. pp. 92-101

[29] Cordo Oscar V. [1994]. Diseño estructural de caminos, Método AASHTO `93 traducido. Escuela de ingeniería de caminos de montaña (EICAM). San Juan, Argentina.

[30] Campana, Juan Manuel y Rozada Perret, Blas [2004]. Consideración de la adherencia entre capas asfálticas en el análisis estructural. Comisión Permanente del Asfalto. Argentina.

[31] Raab C. and Partl M. N. [2004]. Interlayer shear performance: experience with different pavement structures. Paper 081, 535-545. 3rd. Eurasphalt y Eurobitume Congress. Viena, Austria.

[32] Tostiscarelli Jorge [2004]. Ensayo para evaluar la adherencia entre capas asfálticas. XXXIII Reunión del Asfalto. Comisión Permanente del Asfalto (CPA). Mendoza, Argentina.



[33] Álvarez Calisto; Cristian Fabián [2007]. Estudio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

[34] Ricci, Luis A.; Fensel, Enrique; Botasso H. Gerardo [2007]. Recapados de pavimentación urbana con productos geosintéticos. La valoración de la adherencia mediante ensayo LCB. V Congreso Latinoamericano de Geosintéticos. Colombia.

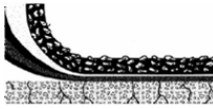
[35] Fernandez Cobo, Milagros; Soto Sanchez, Jose Antonio [2008]. Riegos de adherencia. Diferentes métodos de control: CEDEX, UPC, INTECASA. Panorámica actual de las mezclas bituminosas. Asefma, un nuevo enfoque. Comunicación libre pp. 1-13

[36] Zamora Barraza David; Calzada Pérez Miguel; Castro Fresno Daniel; Vega Zamanillo Ángel [2010]. New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture. Geotextile and Geomembrane Vol. 28, pp 483-489

[37] Al-Qadi, I.; Lahouar, S.; Loulizi, A.; Elseifi, M. and Wilkes, J. [2004]. Effective Approach to Improve Pavement Drainage Layers. Journal of Transportation Engineering, 130 (5), 658-664

[38] Bardasi Alberto et al., [1995]. Aplicaciones de los geotextiles en emplanadas y capas de firme. Revista Rutas N°50. ISSN: 1130-7102. Septiembre 1995. España.

[39] Navas Alejandro; Loria Luis; Elie Y. Hajj [2006]. Desempeño a largo plazo de las técnicas de mitigación de reflejo de grietas en el estado de Nevada. Universidad de Nevada Reno-MS257. Estados Unidos de América.



CAPÍTULO II

DETERIORO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

El Capítulo describe sintéticamente los elementos que conforman un pavimento de hormigón. Se presentan las fallas más significativas que provocan que la fisura se propague hacia la superficie de la capa de refuerzo; se indica el modo y mecanismo de fisuración, destacando la importancia de que un pavimento sea restaurado oportunamente. Se describen las alternativas disponibles en la actualidad para la prevención, evaluación y diseño de refuerzo de pavimentos rígidos. Se exhiben las fallas posibles, debidas a problemas de adherencia entre capas, evidenciadas sobre la capa asfáltica de refuerzo.



II.1 INTRODUCCIÓN

En general, toda estructura posee defectos a alguna escala de observación; éstos pueden originarse en la etapa de construcción o durante el servicio y crecer hasta alcanzar un estado en que debe ser restaurada para prolongar su vida útil.

Las fisuras constituyen uno de los primeros defectos que se evidencian; ellas pueden afectar sólo la apariencia de una estructura pero también pueden corresponder a fallas estructurales significativas.

Los pavimentos de hormigón son estructuras diseñadas con la rigidez suficiente para soportar y transmitir las cargas del tránsito pesado a la capa subyacente inferior, Figura II.1. En ellos las fisuras suelen ser uno de los primeros problemas en manifestarse.

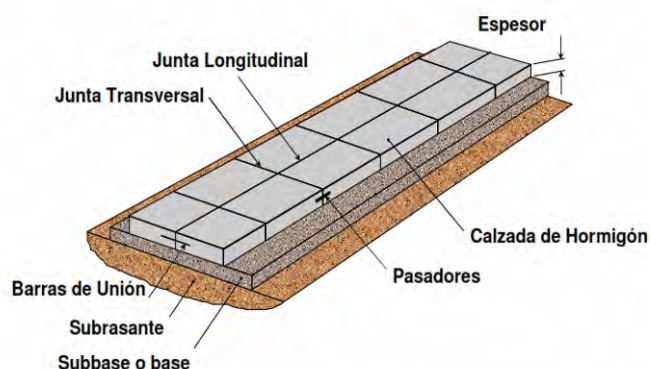


Figura II.1 Componentes de un pavimento de hormigón

Fuente [1] [CALO DIEGO, 2010]

Su concepción resulta de numerosos procesos y elementos que definen su vida de servicio: la evaluación de solicitaciones originadas por el tránsito, las características del medio ambiente, el proceso constructivo, el diseño de bases y subbases, y las propiedades de los materiales, hasta llegar al mantenimiento oportuno. Cualquier anomalía en esta secuencia puede afectar la durabilidad según diferentes mecanismos que tarde o temprano se manifiestan en una fractura visible, perjudicando la



funcionalidad o integridad estructural, alcanzando un umbral de deterioro donde requiere la ejecución de tareas de rehabilitación [2] [ACPA, 2002].

Los pavimentos de hormigón presentan discontinuidades desde la concepción. Las juntas longitudinales, transversales y constructivas se presentan como mecanismos que permiten obtener losas de no más de 24 metros cuadrados con o sin elementos de transferencia de carga denominados pasadores.

Una vez puesto en servicio al tránsito, combinado con las condiciones climáticas, progresivamente se consume su energía interna debido al trabajo desarrollado por las sollicitaciones. A partir de aquí, dependiendo de las características de los materiales y procesos constructivos utilizados pueden registrarse deficiencias como: incorrecto sellado de juntas; saltado de bordes; separaciones de la junta longitudinal; movimientos diferenciales de losas.

La tipología de falla que se presente tiene relación con la sollicitación de las tensiones admisibles de corte, tracción y compresión, que configuran el mecanismo de resistencia a flexión del pavimento [3] [GAETE P., 2008]. Así, comienzan a aparecer fisuras de esquina, fisuras longitudinales y transversales al camino, entre otras. Esto trae como consecuencia un alto nivel de IRI (Índice de Rugosidad Internacional) asociado a un mayor costo de operación e incomodidad al usuario, además de una degradación generalizada del pavimento con un alto costo de conservación. Figura II.2.

Mas allá de los mecanismos de deterioro estructural pueden observarse otros que pongan en evidencia deterioros superficiales debido a la fisuración por contracción (tipo malla), desintegración, formación de baches, fisuración por durabilidad, etc.

Se pueden registrar también levantamientos localizados, escalonamiento de juntas y fisuras, descenso de la banquina, separación entre banquina y



pavimento, parches deteriorados, arrastre de finos (bombeo), textura inadecuada y fracturación múltiple [4] [OROZCO J. M., et al., 2004].

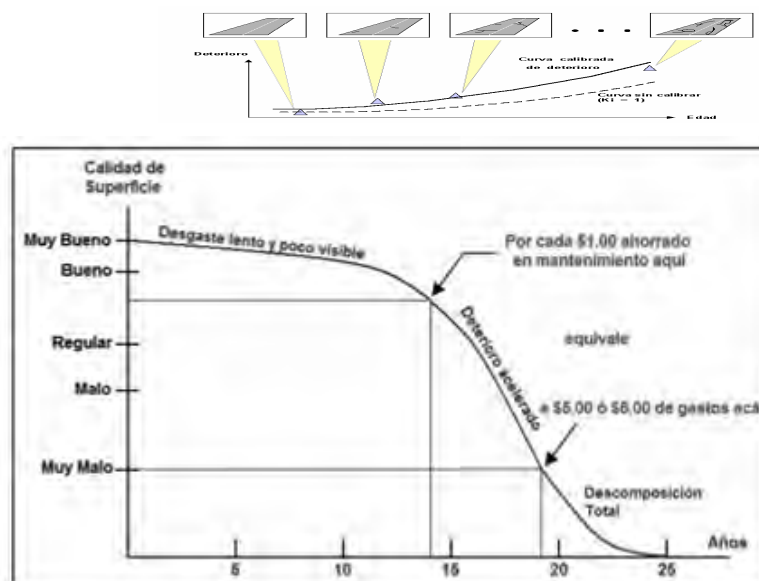


Figura II.2 Progreso de deterioro de un pavimento

Fuente [5] [VEAS L., PRADEMA M., 2010]

Ante las patologías que manifiesta un pavimento, resulta bueno disponer de un sistema que permita clasificar y codificar las fallas en éstos, a fin de asociarlo a las causales de formación, y por ende también a establecer los criterios de reparación con el objeto de neutralizar la zona inestable. En general se realizan verificaciones de movimiento de las losas, cargando una de ellas y observando si existen los mecanismos de transferencia de cargas entre las mismas o si actúan por separado.

II.2 DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS

Los aspectos que definen el desempeño de un pavimento, más allá de las variables mencionadas anteriormente, está dado por la ausencia de fisuras y fallas, la rugosidad o confort de marcha, y por la textura superficial que debe proveer adecuadas características de fricción con bajos niveles de ruido [6] [SOUZA E., 2008]. Por ello que el desempeño



deseable de un pavimento se obtiene al asegurarse de que se minimicen los casos de deterioro que pueden desarrollarse.

II.2.1 Fallas sobre el pavimento de hormigón

Se presenta un resumen de las fallas existentes en un pavimento de hormigón que generan la fisuración refleja sobre la capa asfáltica, las causas que originan ese estado y se da una breve recomendación para su tratamiento [7] [FLORANTE B.; IMAD B., 2008]; [8] [DELATTE N., 2008]; [9] [DNIT, 2005]; [10] [ITURBIDE J., 2002].

II.2.1.1 Fisura transversal o diagonal

Fractura de la losa: ocurre perpendicular al eje del pavimento o en forma oblicua a éste, dividiendo la misma en dos planos, Figura II.3.

Causas: excesivas repeticiones de cargas (fatiga), asentamientos de la fundación / deficiente apoyo de las losas, excesiva relación longitud / ancho de la losa, deficiencias en la ejecución de las mismas, variación en el espesor de la losa y ausencia de juntas transversales.

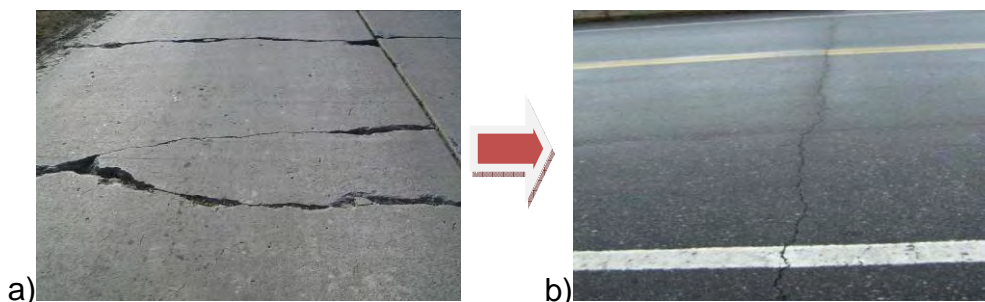


Figura II.3 Fisura transversal o diagonal
a) pavimento de hormigón; b) pavimento asfáltico

Tratamiento y mantenimiento sugerido: si existen dos fisuras en una misma losa, se adopta el nivel de severidad de la fisura predominante. Según los niveles de deterioro y porcentaje que presente la losa se considera: limpiar y sellar, reposición de losas o posible rehabilitación.



II.2.1.2 Fisura de esquina

Es una fisura que intercepta la junta o borde que delimita la losa a una distancia menor de 1,3 m a cada lado medida desde la esquina. Las fisuras de esquina se extienden verticalmente a través de todo el espesor de la losa, Figura II.4.

Causas: son producidas por la combinación de factores tales como acción de cargas pesadas, deficiente apoyo de las losas (posiblemente a falla de drenaje), variaciones en el espesor de la losa y deficiencias en transferencia de carga entre losas.

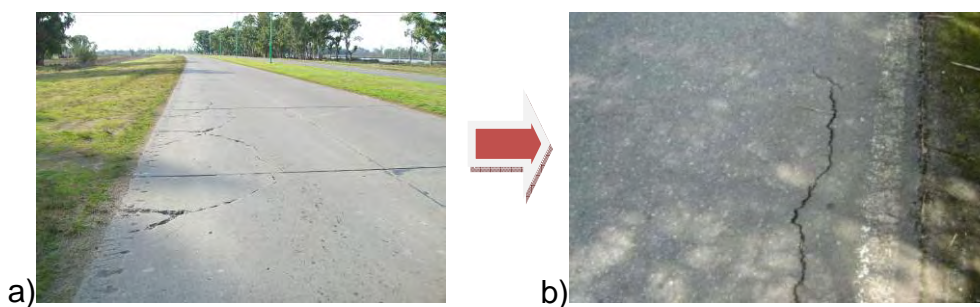


Figura II.4 Fisura de esquina o borde
a) pavimento de hormigón; b) pavimento asfáltico

Tratamiento y mantenimiento sugerido: se registra el nivel de severidad correspondiente al más desfavorable. Puede medirse totalizando metros lineales en la sección evaluada. Según los niveles de deterioro y porcentaje que presente la losa se considera: limpiar y sellar, reposición parcial o total de losas o posible rehabilitación.

II.2.1.3 Fisura longitudinal

La fractura de la losa ocurre en forma paralela al eje del pavimento, dividiendo la misma en dos planos, Figura II.5.

Causas: son producidas por la combinación de factores tales como excesivas repeticiones de cargas pesadas (fatiga), deficiente apoyo de las



losas, gradientes de tensiones originados por cambios de temperatura y humedad, excesiva relación longitud / ancho de la losa, deficiencias en la ejecución de las mismas y ausencia de juntas longitudinales.

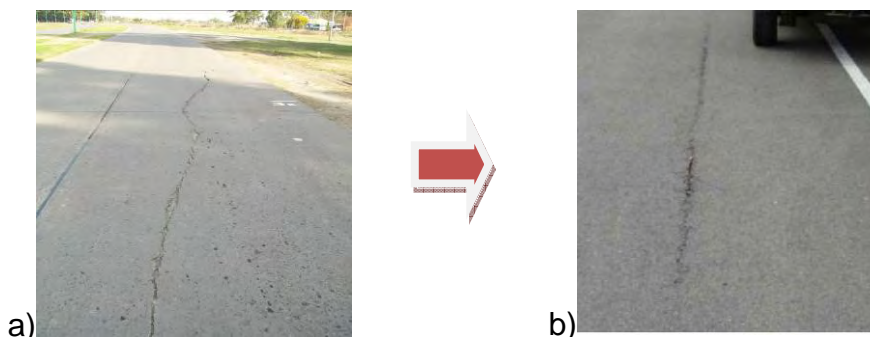


Figura II.5 Fisura longitudinal
a) pavimento de hormigón; b) pavimento asfáltico

Tratamiento y mantenimiento sugerido: si existen dos fisuras en una misma losa, se adopta el nivel de severidad de la fisura predominante. Según los niveles de deterioro y porcentaje que presente la losa se considera: limpiar y sellar; recapar con mezcla asfáltica en caliente.

II.2.1.4 Losas subdivididas o fragmentación en bloques

La fractura de la losa conforma una malla amplia, donde se combinan fisuras longitudinales con las transversales y/o diagonales, subdividiendo la losa en cuatro o más planos, Figura II.6.

Causas: ocurren por una combinación de excesivas repeticiones de cargas pesadas (fatiga); deficiente apoyo de las losas; fatiga del hormigón y variaciones en el espesor de la losa.

Tratamiento y mantenimiento sugerido: según los niveles de deterioro y porcentaje que presente la losa se considera: limpiar y sellar; reponer la losa; rehabilitar (posiblemente).

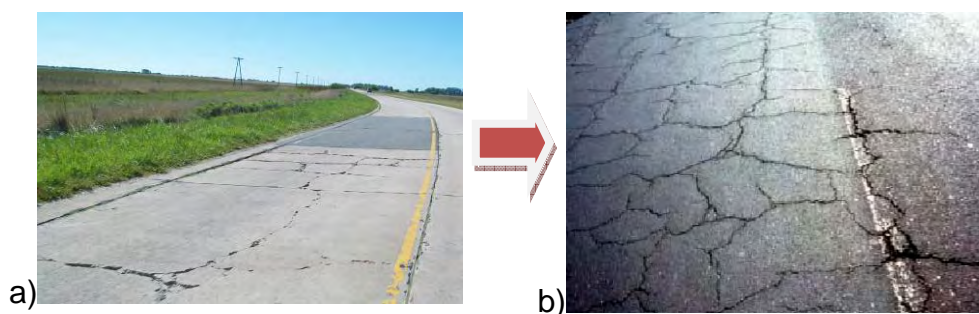


Figura II.6 Losas subdivididas
a) pavimento de hormigón; b) pavimento asfáltico

II.2.1.5 Levantamiento de losas o dislocamiento

Elevación abrupta de la superficie del pavimento, localizada generalmente en zonas contiguas a una junta o fisura transversal, Figura II.7.

Causas: son producidas por falta de libertad de expansión de las losas; las mismas ocurren en la proximidad de las juntas longitudinales por restricción en la expansión de las losas, falta de verticalidad de las juntas, raíces de árboles y algunos acompañados de fracturamiento.

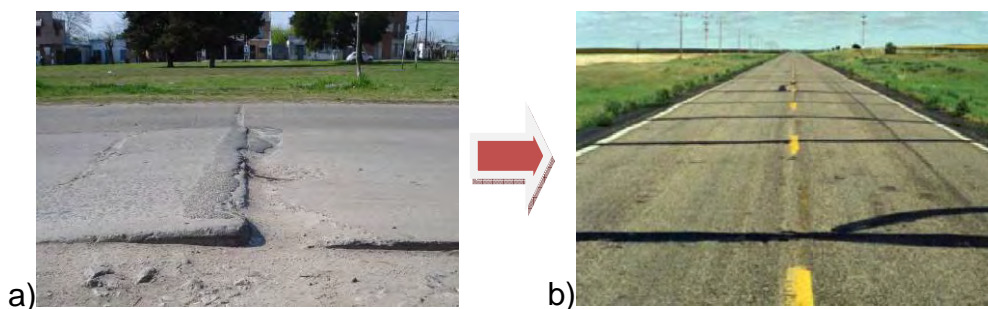


Figura II.7 Levantamiento de losas
a) pavimento de hormigón; b) pavimento asfáltico

Tratamiento y mantenimiento sugerido: según los niveles de deterioro y porcentaje que presente la losa se considera su reposición, la reparación a profundidad parcial o total / la reposición o bien la posible rehabilitación.

Si bien existen otros tipos de fallas, generadas por otros fenómenos como falla de pasadores y alabeos de losas, las presentadas son las típicas



fisuras que ante carga externa siguen presentando movimiento cuando se realiza una capa de restauración. Por motivos citados se debe realizar, antes de la colocación de una carpeta asfáltica sobre el pavimento de hormigón deteriorado, un profundo estudio observando la patología de las fisuras a fin de establecer el origen de las causas de deterioro que el pavimento manifiesta para poder actuar correctamente.

Una vez colocada la capa asfáltica, las fisuras en la superficie son en general de naturaleza estéticas y no reducen el desempeño del pavimento. No en tanto, en los casos en que las fisuras son superiores a 6 mm de espesor pueden ocurrir problemas estructurales [11] [ADASKA S. and LURH D., 2004], ya que la penetración del agua y con la carga frecuente del tránsito, el agua bombea los finos de la capa subyacente.

II.2.2 Fallas por adherencia sobre la capa asfáltica

A través de la bibliografía consultada [12] [DNIT, 2006]; [13] [ROBERTO J. y SALGUERO A., 2004]; [14] [CDCII, 2002]; [15] [RODRIGUEZ R. et al., 1998], se pudo constatar que la falla por adherencia en pavimentos no es considerada de la manera correcta en cuanto a la problemática que ésta representa, sino que se toma como defectos superficiales (corrimientos o shoving) que deben ser restaurados oportunamente.

II.2.2.1 Falla por corrimiento

Las fallas por adherencia, denominadas “shoving” o corrimientos [16] [BELLINGER Y. W., MILLER J. S., 2003] son desplazamientos longitudinales localizados en áreas de la superficie del pavimento, generalmente causados por el frenado brusco de los vehículos o las aceleraciones repentinas que suelen darse en pendientes, curvas o intersecciones, Figura II.8.

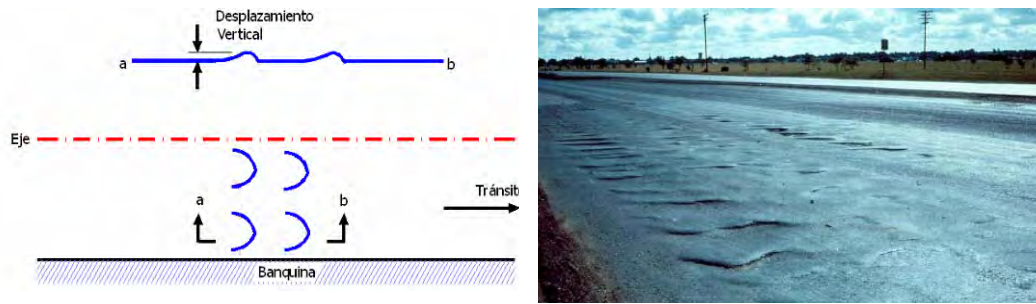


Figura II.8 Falla por corrimiento sobre la capa de rodamiento

Se define al término corrimiento o “shoving” como distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, a veces acompañados por levantamientos de material formando “cordones”, laterales, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje del camino [17] [TURBIDE J. C., 2000], Figura II.9.

Típicamente puede identificarse a través de la señalización horizontal del pavimento, observando demarcación de los carriles, por efecto de corrimiento. Una de las principales causas es la inadecuada ejecución del riego de liga, dando como resultado la escasa adherencia entre la capa asfáltica de rodadura y su capa subyacente.

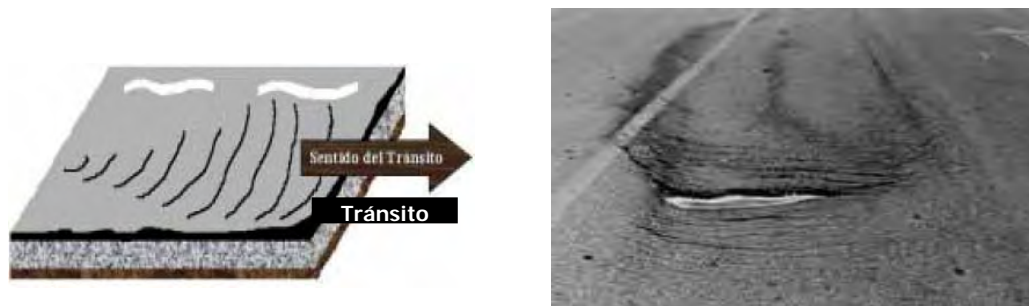


Figura II.9 Falla del tipo “shoving” o corrimiento

II.2.2.2 Falla tipo media luna o en arco

El corrimiento puede venir acompañado de otro tipo de falla identificada como Fisuras en Arco, la cual se debe a una deficiencia de la adherencia entre las capas del pavimento, Figura II.10.



UZAN et al., (1978) citado por [18] [RICCI L., 2011] señala que las grietas en forma de arco pueden desarrollarse bajo las cargas verticales y horizontales en los puntos donde la adherencia es débil debido a una mala construcción.



Figura II.10 Falla del tipo fisuras en arco o media luna

II.2.2.3 Falla tipo corrugación

También se puede presentar la falla por corrugación; ésta consiste en una serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1,0 m entre ellas, a lo largo del pavimento, Figura II.11.



Figura II.11 Falla del tipo corrugación

Estas fallas se asocian con los problemas de adherencia de la capa intermedia [19] [KENNEDY y LISTER, 1980]; [20] [PEATTIE, 1980].

Otros autores [21] [LIVNEH y SCHLARSKY, 1962]; [22] [SETRA, 1986], [23] [LEPERT et al., 1992]; [24] [HACHIYA y SATO, 1997]; [25] [AL



HAKIM et al., 2000]; [26] [SANGIORGI et al., 2003]; [27] [ROMANOSCHI y METCALF, 2003]; y [28] [CANESTRARI et al., 2005] indican que la pérdida de adherencia interfacial da lugar al deterioro del pavimento.

En cuanto a las capas asfálticas, [29] [DRAGOMIR MIHAI, PETIT CHRISPOTE 2011] indican que de no estar bien ligadas las capas, la vida de la estructura se reduce en un 90%.

[30] [AMERI-GAZNON y LITTLE 1990] declara que la unión de la interfase es el factor mas importante que afecta la distribución del esfuerzo cortante dentro de una capa de asfalto y, además, que la pérdida de unión permite el desarrollo de resistencia a la tracción horizontal en la interfaz del pavimento asfáltico y de la base, lo que aumenta los esfuerzos cortantes en la capa de la superficie; esto conduce a mayor posibilidad de ahuellamiento.

Pensando en la interposición de los materiales geosintéticos entre las capas de un pavimento, los principales factores que pueden alterar la adherencia entre las mismas son: el tipo de superficies a unir, la textura de cada superficie, el tipo de material o sistema utilizado en la interfase, uniformidad y dotación en la aplicación de riegos de adherencia y el sistema constructivo.

Basados en estos factores, la incorporación de un material geosintético, entre capas, altera las condiciones de monolitismo de la estructura. Por ello es importante cuantificar en que proporción los materiales geosintéticos ayudan o afectan la vida útil de un pavimento, cuando se desea rehabilitar un pavimento de hormigón con mezcla asfáltica.

II.3 PROPAGACIÓN DE FISURA EN PAVIMENTOS

La formación y propagación de fisuras en los pavimentos ocurre por diferentes solicitaciones (tránsito, clima, fundación, etc.) y mecanismos diversos (dilatación, contracción, corte, etc.), Figura II.12; por lo general,



se manifiesta en tres etapas [31] [TOSTISCARELLI J. y GODOY A., 1993]; [32] [MONTESTRUQUE G., 2002], entre otros:

- Inicio de fisuración (por fatiga del material o en correspondencia con una junta).
- Crecimiento estable de la fisura.
- Propagación inestable de la fisura (aparición en la superficie).

El tiempo que tarda la fisura generada en aparecer en la superficie de la capa de refuerzo asfáltico aumenta con el espesor de la capa. La naturaleza de la capa de refuerzo es importante porque la fisura se propaga más rápido cuanto más frágil sea el material utilizado debido a las tensiones que se producen en la punta de la fisura.

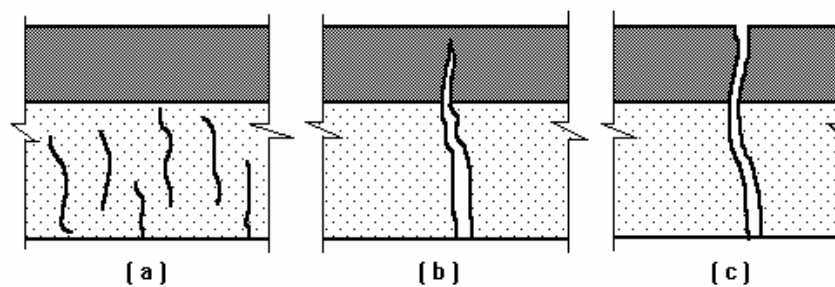


Figura II.12 Formación y propagación de fisuras

Goacolou H. y Marchand J. (1982) propusieron un mecanismo para explicar el progreso de la fisura refleja en la estructura de un pavimento [33] [FRANKEN L. y VANELSTRAETE A., 2005], Figura II.13. Este mecanismo puede ser dividido en:

- Fisuración de la capa asfáltica de refuerzo sobre la capa existente ya fisurada, produciéndose una fisuración horizontal hasta que haya un redireccionamiento vertical de la fisura.
- Propagación de la fisura vertical desde el inicio por el hecho de ocurrir una concentración de tensiones en la región de la



extremidad de la fisura, provocando la abertura de una nueva fisura por fatiga en la capa de refuerzo.

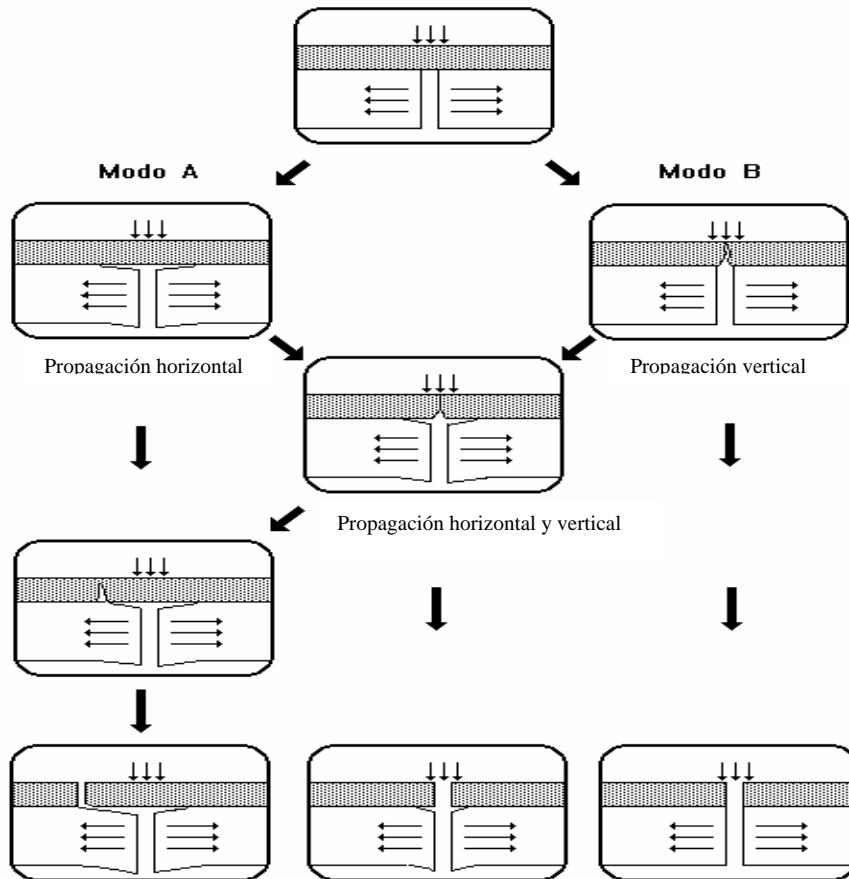


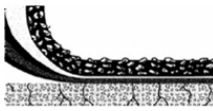
Figura II.13 Mecanismo de propagación de fisura

Fuente [33] [FRANKEN L. y VANELSTRAETE A., 2005]

II.3.1 Modo en que puede producirse la fisura

Dependiendo de la dirección en que actúa el esfuerzo exterior, del plano y el frente de la fisura se definen tres modos de rotura, Figura II.14. [34] [RODRIGUES M., 1991]; [32] [MONTESTRUQUE G., 2002]; [35] [MEDINA J. y MOTTA L., 2005]:

- Modo I o de tracción, en el que el esfuerzo es perpendicular al plano de la fisura.
- Modo II o de cortante, en el que el esfuerzo es paralelo al plano de la fisura y perpendicular a su frente.



- Modo III o de torsión, en el que el esfuerzo es paralelo al plano de la fisura y paralelo a su frente.

La Figura II.14 muestra un esquema de los tres modos indicados. El más usual es el modo I y el modo II; éstos son los elegidos metodológicamente como referencia en el desarrollo de la presente investigación.

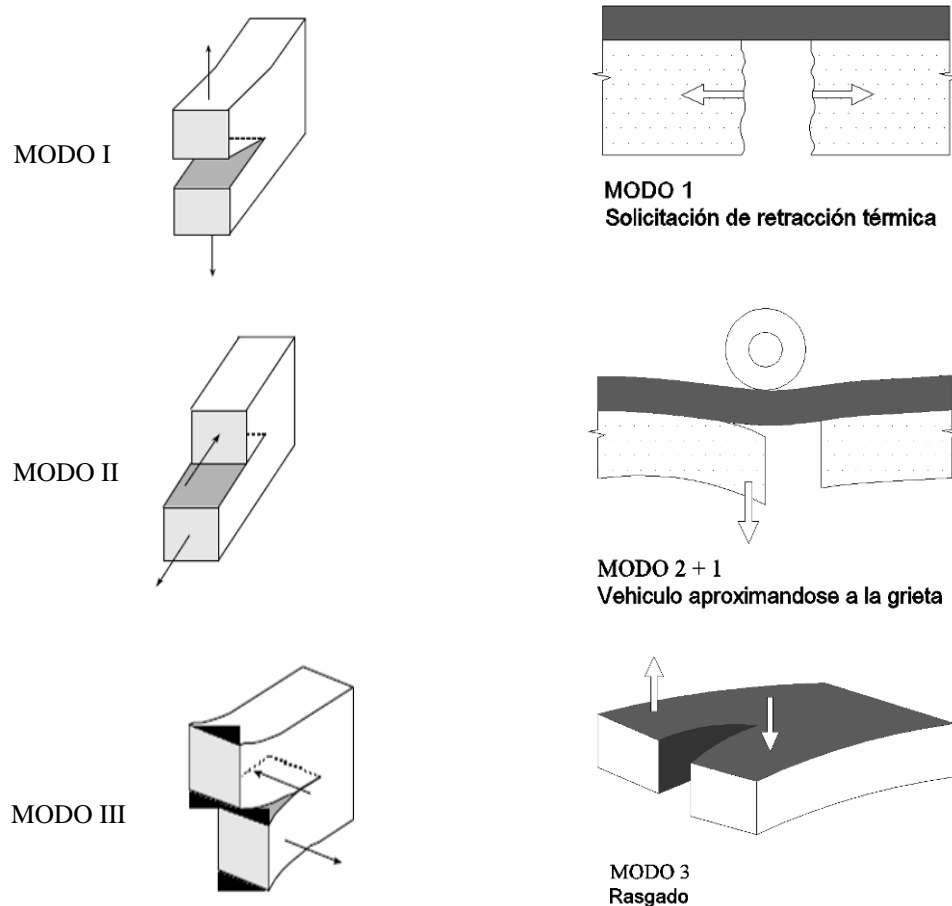
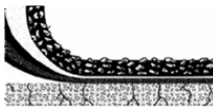


Figura II.14 Modos en que se produce la fisura

II.3.2 Mecanismo de reflexión de fisura

Los autores [36] [NUNN M., 1989] y [32] [MONTESTRUQUE G., 2002] señalan tres mecanismos que desencadenan la reflexión de fisuras, Figura II.15: fatiga debido a la acción térmica (expansión y contracción), fatiga debido a la contracción térmica (variación del gradiente térmico en todo el pavimento) y fatiga causada por acción del tránsito.



Sin embargo, [37] [DE BONDT A., 1999] afirma que existen otros mecanismos como la consolidación y/o contracción del suelo y los defectos de construcción.

En resumen, las posibles causas que favorecen la aparición y propagación de fisuras en un pavimento pueden ser:

- **Fatiga:** pasadas repetidas de carga de tránsito pesado, causando la rotura de la capa después de determinados números de ciclos.
- **Contracción:** el uso de capas estabilizadas con ligantes hidráulicos (cemento, cal u otros materiales) y la presencia de temperaturas muy bajas provocan contracción en las capas del pavimento, ocasionando la aparición de fisuras.
- **Movimiento del suelo de fundación:** el desarrollo de movimientos horizontales perpendiculares a la fisura o junta son importantes. Se debe contemplar también que los movimientos verticales y especialmente los diferenciales entre los bordes de la fisura contribuyen al fenómeno.
- **Defectos de construcción:** son causados por la mala característica de los materiales de las capas del pavimento, por la mala ejecución de las juntas longitudinales o por el dislocamiento de las capas que deberían permanecer unidas para que su desempeño sea satisfactorio.

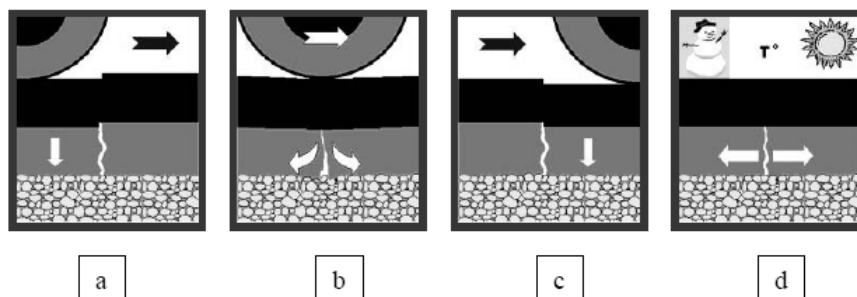


Figura II.15 Solicitaciones en las fisuras de un pavimento a) y c) fatiga por sollicitación cortante; b) fatiga por sollicitación de flexión; d) sollicitación debido a carga térmica



Cuando las cargas del tránsito pasan repetidas veces sobre la fisura del pavimento antiguo, tres pulsos de alta concentración de tensiones ocurren en la extremidad de la fisura [32] [MONTESTRUQUE G., 2002], la cual progresa a través de la capa de refuerzo, como se indica en la Figura II.16 y se describe seguidamente:

- El primer pulso de tensiones es la máxima tensión cortante, indicado en el punto “A”.
- El segundo pulso de tensiones es debido al momento flector máximo, que ocurre en el punto “B”.
- El tercer pulso de tensiones es nuevamente la máxima tensión cortante, pero esta vez en la dirección opuesta a la anterior tensión cortante (punto “A”) que resulta mayor con la posición de la carga en el punto “C”, donde se forma un vacío por debajo del pavimento antiguo por efecto de bombeo de finos a la superficie.

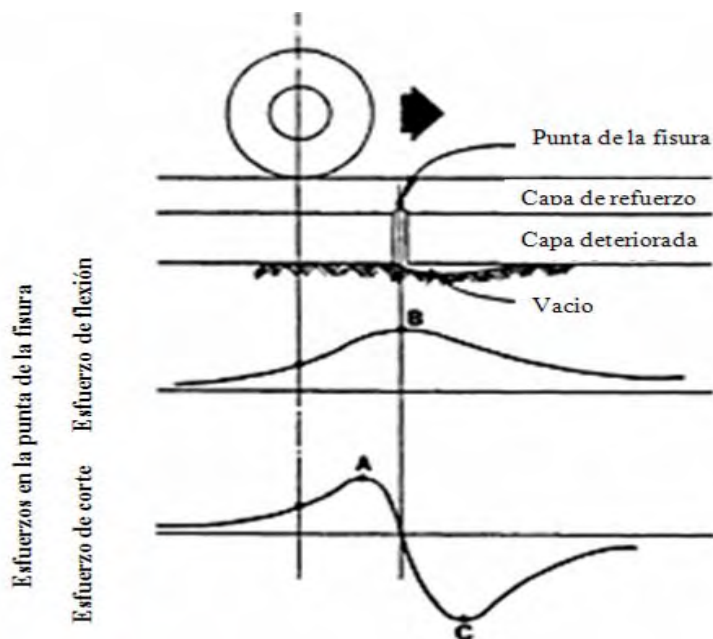


Figura II.16 Tensiones en la extremidad de la fisura con el paso de una carga de rueda, Lytton R. 1989 citado por [32] [MONTESTRUQUE G., 2002]

Estos tres pulsos de tensiones ocurren en un corto lapso (del orden de 0,05 segundos). Las variaciones de temperatura en la capa de refuerzo



pueden contribuir también a la reflexión de fisuras, debido a las tensiones provocadas por:

- Gradiente de temperatura entre la superficie y la base como se indica en la Figura II.17 en el punto “A”;
- Contracción por enfriamiento, con aumento de la antigua capa asfáltica como se muestra en la misma Figura II.17, en el punto “B”. Se observa que tensiones térmicas pueden causar la propagación de la fisura, tanto en la parte superior de la superficie como de la parte inferior de la capa de refuerzo. La contracción y la curvatura de la antigua superficie aplican tensiones cortantes en la parte inferior de la capa de refuerzo y produce concentración de tensiones de tracción en el punto “B”.

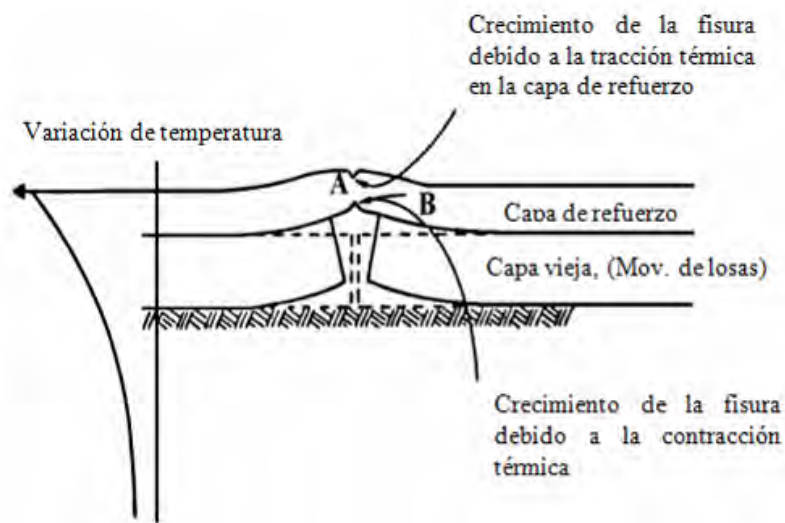


Figura II.17 Cambios de temperatura y consecuente fisuración de la capa de refuerzo, Lytton R. 1989 citado por [32] [MONTESTRUQUE G., 2002]

La variación de temperatura en el pavimento ocurre muy lentamente, en períodos de varias horas. Cada vez que la carga pasa y cada vez que la temperatura decrece en la capa de refuerzo, la longitud de la fisura de reflexión aumenta un poco más. La mejor opción para retardar el crecimiento de la fisura de reflexión puede estar en la selección de las



propiedades del material utilizado en la capa de refuerzo, así como el uso de una capa intermedia, de manera de reducir tanto cuanto fuera posible, la concentración de tensiones que las fisuras subyacentes provocan en la capa de refuerzo.

II.3.3 Capas intermedias como sistema anti-reflejo de fisuras

De acuerdo a lo planteado anteriormente, una capa que actúe como elemento atenuador de fisuración refleja debe ser flexible y deformable ante sollicitaciones lentas por efecto térmico, ser rígida para soportar las sollicitaciones rápidas del tránsito, poseer buena adherencia con la capa de apoyo, experimentar reducidas deformaciones para no afectar por fatiga a la capa que sustenta, ser resistente a las deformaciones permanentes y mantener la impermeabilidad [38] [MORENO O., 2010].

Los diversos sistemas anti-reflejo de fisuras pueden ser dosificados en función de la naturaleza de la capa intermedia [39] [RODRIGUEZ R., 2001], la cual influye en el control del mecanismo de propagación:

- Capa de absorción de tensiones: construida de materiales de alta ductilidad.
- Capa de absorción de movimientos: construida de material granular o mezclas asfálticas abiertas; son recomendables cuando las deflexiones diferenciales entre paredes de la fisura o juntas son elevadas (> 2mm).
- Capa de alivio de fisuras: es aquélla que atrasa el surgimiento de la fisura por absorber parte de la energía de deformación y re-direccionar la formación y progresión de una separación localizada entre la capa intermedia y el pavimento subyacente.

De acuerdo entonces al tipo de capa intermedia utilizada, pueden producirse diferentes comportamientos en la propagación de fisuras, Figura II.18, Figura II.19 y Figura II.20.

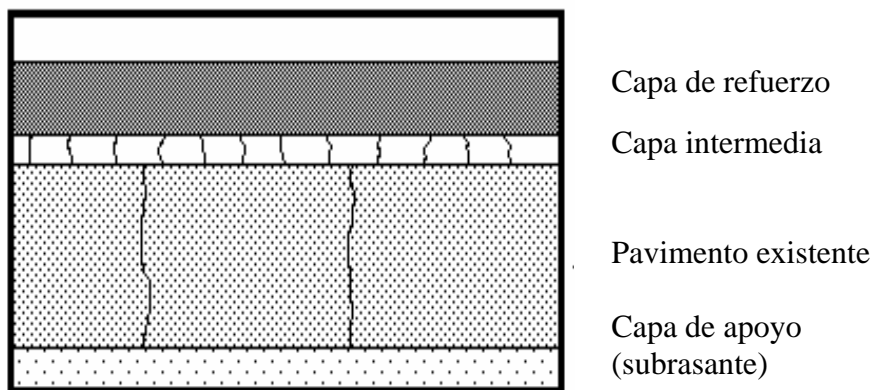


Figura II.18 Reflexión en innumerables micro fisuras

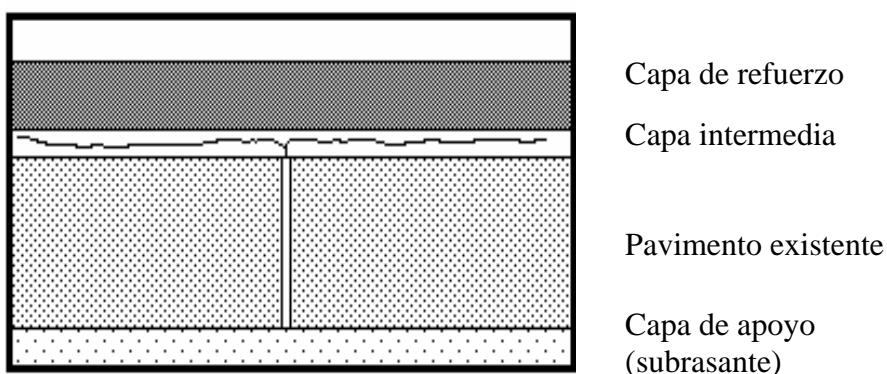


Figura II.19 Re direccionamiento de la fisura

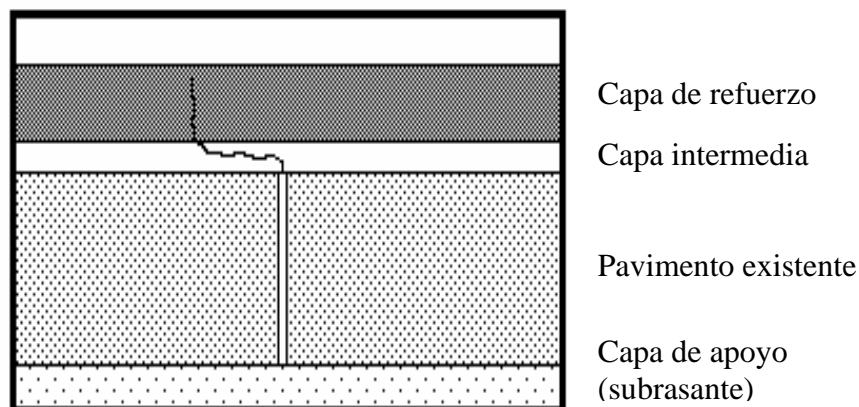


Figura II.20 Re direccionamiento de la fisura y atraso de la reflexión

No es justificable el uso de sistemas intermedios de bajo espesor en los casos donde se evidencien: fisuras con movimientos relativos excesivos de bordes; fisuras con gran variación de abertura por ciclos térmicos o fisuras por fatiga generalizada del pavimento.



Se debe aclarar que la interposición de un sistema intermedio entre capas de un pavimento no se traduce en un refuerzo estructural ya que no cuenta con la capacidad de absorber esfuerzos normales como movimientos entre losas y asentamientos de la subrasante.

Las experiencias indican que existen beneficios pero debe quedar en claro que la resistencia a la propagación de la fisura envuelve todos los componentes del pavimento: capa de refuerzo; capa intermedia, si existiera, estructura del pavimento antiguo y suelo de subrasante. Cada uno de estos componentes debe ser tratado en la búsqueda de la eficiencia del sistema global.

II.4 ADHERENCIA ENTRE CAPAS

II.4.1 Importancia y consecuencias

En un sistema multicapas como el del pavimento, los movimientos relativos entre las capas componentes son un origen importante de fisuras, Figura II.21. Cuando la adherencia entre capas es escasa, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana ante las sollicitaciones del tránsito debido al consumo de energía interna del material [40] [LAERTE MARONI G., 1993]. Esta falta de vínculo se traduce en una mala o nula distribución de tensiones en el espesor total del pavimento.

[41] [PONNIAH et al., 2006] explica que es conveniente asegurar una buena unión entre capas para que toda la estructura del pavimento actúe como una capa monolítica, para proporcionar el comportamiento esperado. [42] [LENG et al., 2008] apoya esta posición e indica que el vínculo entre una capa de HMA (Hot Mix Asphalt) sobre un pavimento de hormigón es uno de los factores más importantes que pueden alterar la vida útil del pavimento.

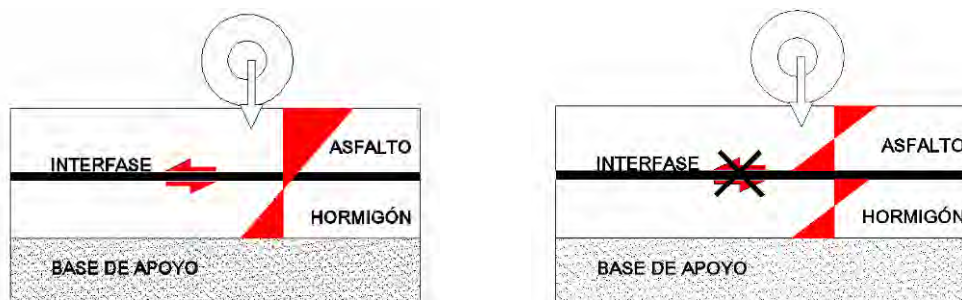


Figura II.21 Resistencia del sistema multicapas: izquierda, capas adheridas y derecha, capas sin adherir

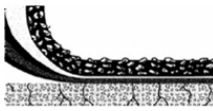
El concepto de sistema multicapa, sometido a una sollicitación de flexión, puede asimilarse al de una viga multilaminada [18] [RICCI L., 2011], donde su resistencia se incrementa en función de su altura, considerando una adherencia total entre sus partes componentes.

Una viga formada por varias capas de espesor delgado, colocadas simplemente apoyadas unas sobre otras, será menos resistente que una viga monolítica de igual altura total. Esto puede demostrarse con la teoría de flexión que dice que la tensión debida a flexión en cualquier sección es directamente proporcional al momento flector (M) e inversamente proporcional al módulo de resistencia de la sección (W).

Para elementos de sección rectangular, como puede considerarse la estructura de un pavimento, el módulo resistente es directamente proporcional al cuadrado de su altura, con lo cual se evidencia la importancia de poseer espesores de capa considerables y netamente adheridos entre sí.

La tensión o esfuerzo debido a la flexión en secciones rectangulares de materiales homogéneos está dada por la expresión:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{bh^2}{6}}$$



En una viga sometida a flexión simple, los esfuerzos que se generan en una sección de la misma se ven representados en la Figura II.22.

Se aprecia que la mitad superior de la sección está sometida a esfuerzos de compresión mientras que la semi parte inferior lo está a tracción. Por la condición de equilibrio de fuerzas en el eje X en toda la sección, las fuerzas de compresión quedan equilibradas con las de tracción.

Analizando, por ejemplo, la sección delimitada por *abcd*, el esfuerzo de compresión resultante solo puede ser equilibrada por un esfuerzo cortante y de sentido opuesto a la compresión desarrollada en el plano *dce*. Este esfuerzo cortante se ve materializado por la adherencia en los sistemas multicapas; es allí donde reside la importancia de su estudio.

De esta manera queda demostrado que ante sollicitaciones de flexión la adherencia entre las partes componentes de un paquete estructural es de suma importancia.

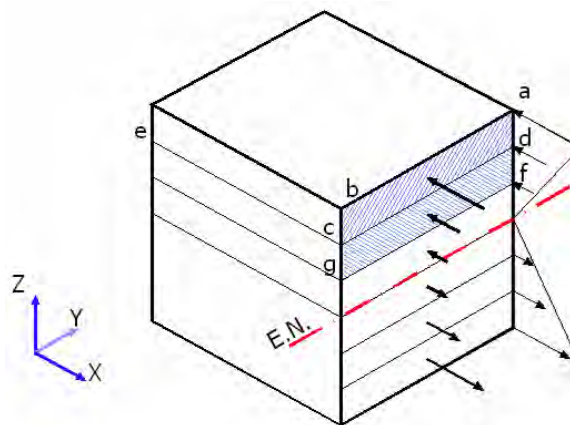
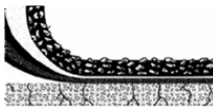


Figura II.22 Esfuerzos de tracción y compresión en viga sometida a flexión

Fuente [18] [RICCI L., 2011]

Asimismo, como la fuerza de compresión total aumenta hasta el eje neutro, es allí donde se requiere una adherencia de mayor importancia para contrarrestar su efecto. Esto también fue demostrado por [43] [SINGER L. y PYTEL A., 2004].



Continuando en esta línea [44] [DARTER M. et al., 1994] modelaron pavimentos a través de programas de elementos finitos en 3D, siendo unánimes en afirmar que al aumentar la capacidad portante del sistema de apoyo, el máximo aprovechamiento ocurre cuando las capas trabajan monolíticamente.

DARTER (1994), citado por [45] [DA SILVA PEREIRA D., 2003] comenta que la adherencia reduce tanto tensiones de flexión debido a la carga como al diferencial térmico.

II.4.2 Adherencia en la interfase del sistema compuesto

Puede definirse la interfase como una superficie a través de la cual se produce una discontinuidad en uno o más parámetros de los materiales o las propiedades, como densidad, módulo de elasticidad, resistencia, coeficiente de expansión térmica, resistencia a la fractura, etc. [46] [ALVAREZ BLANCO F., 2005].

La norma IRAM 45001 [47] [IRAM 45001, 1998] define interfase para una junta adhesiva como la región de medidas finitas que se extiende desde un punto en el adherendo (cuerpo unido a otro por un adhesivo) donde las propiedades puntuales (químicas, físicas, mecánicas, etc.) comienzan a diferenciarse de las propiedades globales, a través de la interfase y dentro del adhesivo hasta el punto donde las propiedades puntuales igualan las propiedades globales del adhesivo.

Las propiedades mecánicas de un material compuesto, como es el sistema estudiado, dependen de las características de sus componentes y de la unión entre ambas capas, es decir de la interfase. Esto es importante por las siguientes razones:

- Mantiene el material geosintético unido y alineado en la dirección que deben trabajar las fibras.



- Actúa como el medio a través del cual se transmite y se distribuye a las fibras el esfuerzo aplicado externamente, siempre que exista buena adherencia.

La adherencia puede ser pensada, a nivel microscópico, como el efecto aglutinador de distintos materiales en la transformación de éstos en un material diferente [45] [DA SILVA PEREIRA D., 2003], con propiedades distintas de los materiales que le dieron origen.

Según [48] [FUSCO F. B., 1995], la adherencia puede ser considerada como:

- Adherencia mecánica, Figura II.23.a: la adherencia surge en caso de utilizar pasadores de transferencia de carga en las juntas de los pavimentos de hormigón. Este tipo de unión es poco efectiva para esfuerzos de tracción pero efectiva para esfuerzos cortantes.
- Adherencia por adhesión, Figura II.23.b: este tipo de unión se da cuando una de las superficies tiene carga positiva y la otra negativa. Esto conduce a una atracción electrostática entre los componentes del material compuesto que depende de la diferencia entre las cargas de las superficies. La contaminación superficial y los gases atrapados disminuyen la adherencia.

Según [49] [SHAH P. y AHMAD S., 1994] la adherencia física involucra las fuerzas de van der Waals y reacciones químicas entre las diferentes fases de la emulsión con los materiales.

- Unión química Figura II.23.c: se genera cuando la superficie del geosintético tiene grupos químicos compatibles con grupos químicos de la matriz.

Hay dos tipos principales de unión química:

- Unión por disolución: las interacciones son de corto rango. Cualquier contaminación de la superficie de las fibras, aire



atrapado, burbujas de gas en la interfase, etc. dificultan el contacto necesario entre los materiales.

- Unión de reacción: se produce por el transporte de moléculas de uno o ambos componentes en la interfase. Cuando se trata de dos superficies poliméricas, se pueden formar enlaces moleculares enredados o entrelazados en la interfase.

- Unión mediante inter difusión [50] [MADRID M., 1999], Figura II.23.d: en este tipo de unión la superficie del refuerzo y de la matriz tienen cadenas poliméricas que se difunden entre ellas. La fuerza de esta unión dependerá del grado de entrelazado molecular y del número de moléculas implicadas.

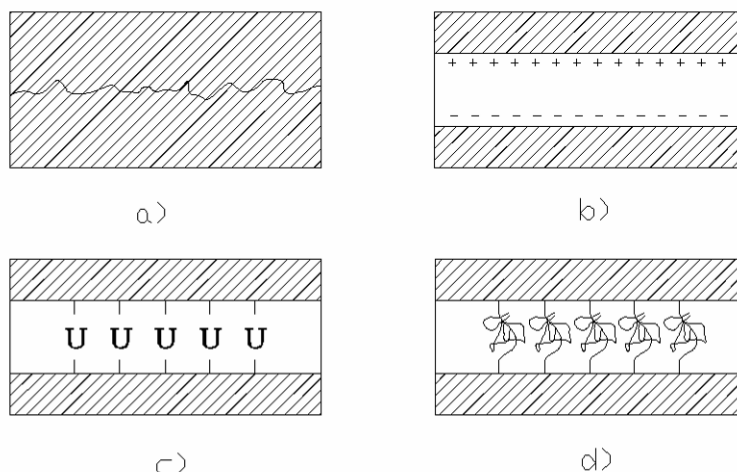


Figura II.23 Diferentes tipos de uniones en la interfase

La adherencia entre el hormigón y el refuerzo asfáltico es un punto de vital importancia por lo cual el material de refuerzo colocado (geosintético) debe proveer tal unión, y así cumplir con eficacia su función [51] [FERREIRA DA SILVA A., MONTESTRUQUE G., 2000]. Para esto se debe tener en cuenta:

- El coeficiente de dilatación entre el material de refuerzo y la capa base deben ser compatibles. Las diferencias entre coeficientes de



dilatación producen tensiones de corte entre las capas causadas por los movimientos de expansión y contracción.

- El material geosintético debe absorber las tensiones de tracción trabajando en cooperación con las capas; esto es posible si se encuentra bien anclado, pues solo debe trabajar por debajo de la tensión límite de adherencia y aportar la resistencia si hubiese estímulo a la deformación.
- A fin de permitir que se establezca una cooperación entre ambos materiales, el módulo de elasticidad debe ser compatible. Tanto el geosintético como las demás capas deben absorber los esfuerzos.
- Al introducir un refuerzo rígido en la interfase, la mayoría de las tensiones son absorbidas directamente por el refuerzo, para posteriormente transferirse a la base en función de la adherencia e inter trabado. Por otro lado un material muy deformable no tiene la resistencia suficiente para absorber tensiones en la estructura.

La fuerza de adherencia en el sistema estudiado viene regida por la capacidad de la emulsión (porcentaje de residuo, dureza del betún y el tipo de polímero) para ligar los materiales.

II.5 REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

Los pavimentos a ser rehabilitados pueden clasificarse según su finalidad, en estructurales y superficiales [52] [SOTO SÁNCHEZ J. A., 2006].

Las primeras tienen por objeto aumentar significativamente la capacidad estructural del camino existente, adecuándola a las acciones del tránsito previsto durante su período de servicio. El objeto de los segundos es conservar o mejorar sus características funcionales (seguridad, comodidad, etc.) y la protección del conjunto del camino (aumento de la durabilidad, impermeabilidad, uniformidad, aspecto, etc.).



II.5.1 Rehabilitación estructural

La necesidad de una rehabilitación estructural se plantea si se produce agotamiento estructural del camino; un crecimiento importante de la intensidad de tránsito pesado o gastos excesivos de conservación [53] [ALONSO BURGOS A. J., 2002].

En el primer caso la rehabilitación resulta necesaria por haberse agotado o estar próxima a agotarse la vida útil del camino, aunque no se hubiesen cumplido las hipótesis del proyecto. Se evalúa por medio de una inspección visual y de una auscultación efectuada con equipos de gran rendimiento o mediante ensayos puntuales.

En el segundo caso, un incremento del volumen de tránsito pesado sobre las previsiones realizadas, cuando el tramo objeto de estudio se puso en servicio, puede producir un agotamiento acelerado del camino a corto o mediano plazo, lo que hace conveniente su rehabilitación por consideraciones técnicas o económicas.

El tercer caso debe ser consecuencia de la gestión de la conservación del camino que puede predeterminar cuáles son los gastos de conservación normales y además establece el umbral a partir del cual un incremento de estos gastos indica que se debe cambiar de estrategia de conservación.

II.5.2 Rehabilitación superficial

Se lleva a cabo cuando no es necesaria una rehabilitación estructural pero el estado superficial del pavimento presente deficiencias que afectan a la seguridad de la circulación, a la comodidad del usuario o a la durabilidad del pavimento. Las deficiencias que, en determinado grado pueden justificar una rehabilitación superficial del camino, son [53] [ALONSO BURGOS A. J., 2002]:



- Pavimento deslizante por pulimento o por falta de macrotextura.
- Pavimento deformado longitudinal o transversalmente, con una regularidad superficial inadecuada.
- Pavimento fisurado o en proceso de desintegración superficial.
- Cuando, realizada la tramificación, existan tramos cortos (inferiores a 200 m) que no precisen rehabilitación estructural ni superficial, pero estén comprendidos entre dos contiguos que sí la necesitan, es conveniente dar continuidad a la superficie de rodadura, por criterios de uniformidad funcional.

II.5.3 Método para la determinación de una solución adecuada

Una vez establecida la necesidad de la rehabilitación estructural o superficial de un camino, la determinación de la solución más adecuada debe cubrir las siguientes etapas en el caso más general:

- Recopilación y análisis de datos.
- Evaluación del estado del camino y de su nivel de agotamiento.
- Diagnóstico sobre el estado del camino.
- Análisis de soluciones y selección del tipo más apropiado.
- Proyecto de la solución adoptada.

En algunos casos, las etapas anteriores se pueden hacer simultáneamente o simplificar, según sea la naturaleza de los deterioros del camino y la técnica de rehabilitación que se vaya a utilizar. Por lo que a la hora de realizar una intervención en el pavimento, para restaurar sus condiciones normales de capacidad y confort, se deben estudiar las causas que llevaron el pavimento al estado de deterioro que manifiesta. Para ello es bueno contar con sistemas de evaluación y control para decidir la alternativa de rehabilitación más conveniente técnica y económicamente.



II.6 DISEÑO DEL REFUERZO SOBRE PAVIMENTO DE HORMIGÓN

Dentro de la consideración a tener en cuenta para el diseño de estructuras de un pavimento de hormigón es necesario analizar la problemática de los mismos debido al tránsito, ya que éste incrementa conforme al desarrollo tecnológico y crecimiento demográfico, lo que incrementa la repetición de ejes y cargas [10] [ITURBIDE J. C., 2002].

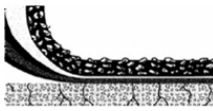
II.6.1 Modelos de diseño

La reflexión de fisuras es considerada uno de los principales problemas en el proyecto de restauración de pavimentos. Este efecto invalida cualquier previsión de desempeño convencional y requiere un modelo confiable para fines de dimensionamiento, de modo de minimizar los costos de restauración.

Una gran variedad de métodos o procedimientos para el dimensionamiento de refuerzos de pavimentos fueron desarrollados y son utilizados por varios organismos de caminos; pero no existe un consenso sobre la metodología más adecuada.

Sea cual fuere el método utilizado, es importante validar las condiciones del pavimento existente y subdividirlo en uno o mas tramos homogéneos para análisis, basados en la edad, tránsito, condiciones del pavimento y su estructura, antes de seleccionar la alternativa de reparación a utilizar.

Los pavimentos rígidos en Argentina, se diseñan de acuerdo a metodologías que combinan aspectos tanto empíricos como mecanicistas, se pueden diseñar por la metodología AASTHO de 1993 y algunas modificaciones del año 1997. Este modelo empírico, relaciona las cargas del tránsito (expresada en términos de ejes equivalentes o ESAL), con la estructura del hormigón y la pérdida de serviciabilidad que sufre el pavimento a lo largo del periodo de diseño. La metodología AASTHO 1993 cuestiona el uso de geosintéticos sobre el pavimento de hormigón;

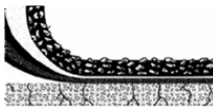


de todas maneras recomienda el uso de un material de alto módulo colocado sobre las articulaciones.

La metodología de la Portland Cement Association (PCA), es del tipo mecanicista, fundamentado en conceptos de la teoría de la elasticidad. Este método analiza tensiones y deflexiones en la losa sometida a distintos niveles de carga, y verifica que se cumplan los dos criterios límites en cuanto a las repeticiones admisibles de carga: el criterio de fatiga, que previene la aparición de las fisuras por fatiga, y el criterio de erosión, que limita las deflexiones máximas en la zona de junta transversal, para prevenir la aparición de vacíos bajo la losa de hormigón. Si bien esta metodología no considera la introducción de materiales geosintéticos es posible, de acuerdo a lo que la metodología propone, tenerlos en cuenta en futuras actualizaciones del método.

La Guía de diseño empírico-mecanicista de pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) adopta inicialmente una serie de parámetros estructurales para el pavimento (número y tipos de capas, indicadores de resistencia de las mismas, características de la subrasante, etc.) y establecer las condiciones de tránsito y de clima a las que se estima que se vera sometido a lo largo del periodo de diseño. Este modelo contempla la zona reflejada de fisuras (en metros) e incorpora el beneficio de los materiales geosintéticos (geotextiles y geogrillas) asumiendo que la introducción de un material geosintético equivale a 2 cm de espesor de mezcla asfáltica.

Otra herramienta computacional elaborada para la definición de políticas de conservación de las redes viales es el modelo HDM-III (Highway Design and Maintenance) del Banco Mundial. Los modelos de predicción de deterioro de pavimentos de hormigón han sido incorporados recién en la versión HDM-4 donde se modela con el porcentaje de juntas en estado de deterioro medio y alto. Al igual que los primeros, este modelo no contempla en sus ecuaciones la introducción de un material geosintético.

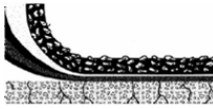


Los modelos de evolución de deterioros representan las características propias de los datos originales con los que fueron desarrollados. Cuando se desea aplicarlos para pavimentos y regiones diferentes, se hace necesario ajustarlos y calibrarlos a las nuevas condiciones. La importancia de esta calibración radica en la posibilidad de optimizar el alcance de las tareas de mantenimiento de los pavimentos de hormigón.

Lo mismo sucede cuando en el diseño se incorpora materiales de diferentes características como la amplia gama de materiales geosintéticos que actualmente el mercado ofrece. Los ingenieros tienen un bajo nivel de conocimiento y confianza sobre el beneficio que se puede alcanzar al incorporar estos materiales. La limitada disponibilidad de métodos de diseño que incorporan mecánicamente geosintéticos, y su rentabilidad incierta y eficiencia cuando se utilizan entre capas de un pavimento, dio lugar a la renuncia a aceptar la tecnología.

II.6.2 Los geosintéticos como herramienta de proyecto

Mediante los ensayos de caracterización de los materiales geosintéticos realizados en el LEMaC, se conocen las propiedades de los mismos y las bondades de su utilización en la rehabilitación de pavimentos. A tales fines, el investigador [54] [KOERNER R., 2005] en su publicación “Designing with Geosynthetics” considera el aporte de la incorporación de geosintéticos en rehabilitaciones, a través del coeficiente de efectividad del material FEF (“Fabric Effectiveness Factor”). Este coeficiente es determinado con los ensayos propuestos en la tesis como la relación entre el número de ciclos que provocan la falla en especímenes con geosintético dividido el número de ciclos que provocan la falla en especímenes sin geosintético. El mismo adopta valores mayores de 1 si el material brinda un mejoramiento en el refuerzo, y valores menores a la unidad si no posee un aporte sobre el sistema de referencia. El tránsito a utilizar en el cálculo del refuerzo es minorado por dicho coeficiente FEF; en ese caso, los valores de espesores del refuerzo resultan menores que en el caso de la no aplicación del geosintético, según el material utilizado.



Visto en fórmulas matemáticas, los conceptos de Koerner son:

$$FEF = N_r / N_n$$

donde:

FEF = coeficiente de efectividad del geosintético.

N_r = número de ciclos de carga que generan la falla en probetas con geosintético.

N_n = número de ciclos de carga que generan la falla en probetas sin geosintético "Referencia".

En el Capítulo VII se presentan los coeficientes de efectividad (FEF) que los diferentes materiales geosintéticos considerados en la investigación, ofrecen cuando se introducen entre capas de un pavimento con el objeto de restaurar sus condiciones de seguridad.



II.8 REFERENCIAS

- [1] Calo Diego H. [2010]. Diseño y construcción de pavimentos rígidos. Jornada de actualización técnica. Dirección Nacional de Vialidad. Distrito XVI. Santiago del Estero, Argentina.

- [2] American Concrete Pavement Association (ACPA) [2002]. Early cracking of concrete pavement, causes and repairs. Concrete paving technology. TB016.01P. USA.

- [3] Gaete P. Rodrigo [2008]. Mezclas asfálticas de graduación abierta. Una alternativa efectiva para prevenir el reflejo de grietas en la rehabilitación de pavimentos de hormigón. 9º Congreso Internacional PROVIAL. Puerto Varas, Chile.

- [4] Orozco Juan Manuel et al., [2004]. Sistema de evaluación de pavimentos. Versión 2.0. Publicación técnica N° 245. ISSN 0188-7297. Instituto mexicano del transporte. Sanfandila Qro. México.

- [5] Veas L.; Pradema M. [2010]. Aplicaciones de la administración integral de proyectos en la industria de la construcción. Segunda parte, proyectos viales. Revista de la construcción. ISSN 0718-915X. Vol. 9 N°2. p. 89-96. Chile.

- [6] Souza Edgardo [2008]. Construcción de pavimentos rígidos con tecnología de alto rendimiento. Diseño, evaluación y control de mezcla de hormigón. Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA).

- [7] Florante Bautista; Basheer Imad [2008]. Jointed Plain Concret Pavement (JPCP) Preservation and Rehabilitation Desing Guide. California Departament of Transportation. Division of Desing. p. 1-50



- [8] Delatte, Norbet [2008]. Concrete Pavement Design, Construction and Performance. Taylor & Francis. 389 p. ISBN 978-0-415-40970-4. USA.
- [9] Departamento Nacional de Infraestructura del Transporte (DNIT) [2005]. Manual de pavimentos rígidos. 2º edición. 234 p. Publicação IPR 714. Rio de Janeiro, Brasil.
- [10] Iturbide, Jorge Coronado [2002]. Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. 2º edición. Secretaria de integración económica centroamericana (SIECA). Guatemala.
- [11] Adaska, W. S.; Lurh D. R. [2004]. Control of Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavement. 5th International RILEM Conference. Limoges, France.
- [12] Departamento Nacional de Infraestructura del Transporte DNIT [2006]; Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Publicação IPR-720. Rio de Janeiro, Brasil.
- [13] Roberto, Josué; Salguero, Aldana [2004]. Mantenimiento de carreteras con concreto en caliente. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [14] CDCII [2002]. Catálogo de deterioro de pavimentos flexibles. Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica. Vol. 11.
- [15] Rodríguez, R. R.; Gutiérrez, R. T.; Anguas, P. G. [1998]. Pavimentos flexibles. Problemática, metodología de diseño y tendencias. Publicación técnica N° 104. ISSN 0188-7297. Sanfandila. Qro.



- [16] Bellinger, William Y. and Miller John S. [2003]. Distress identification manual for the long-term Pavement Performance Program. 164 p. FHWA-RD-03-031.
- [17] Iturbide, Jorge Coronado [2000]. Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. Tomo III. Secretaría de integración económica centroamericana (SIECA). Guatemala.
- [18] Ricci L. A. [2011]. Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercala de geosintético. Tesis de maestría en ingeniería del transporte, orientación vial de la FIUBA. Argentina.
- [19] Kennedy, C.K., and N.W. Lister [1980]. Experimental Studies of Slippage, The Performance of Rolled Asphalt Road Surfacing, Institution of Civil Engineers, London, Great Britain, p. 31-56
- [20] Peattie, K.R., [1980]. The Incidence and Investigation of Slippage Failures. The Performance of Rolled Asphalt Road Surfacing, Institution of Civil Engineers, London, Great Britain, p. 3-15
- [21] Livneh M., and E. Schlarsky [1962]. The Bearing Capacity of Asphalt Concrete Surfacing, Proceedings, 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, p. 345-353
- [22] SETRA/DTC [1986]. Le Decollement des Couches de Revêtement de Chaussees, Note d'information Chaussees – Terrassement n° 25, SETRA.
- [23] Lepert, P. H., J.P. Poilane, and M. Bats-Villard [1992]. Evaluation of Various Field Measurement Techniques for the Assessment of Pavement Interface Condition, Proceedings, 7th International Conference on Asphalt Pavements, International Society of Asphalt Pavements, Nottingham, Great Britain, p. 224-237

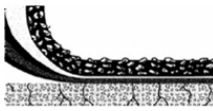


- [24] Hachiya, Y., and K. Sato [1997]. Effect of Tack Coat on Bonding Characteristics at Interface between Asphalt Concrete Layers, Proceedings, 5th International Conference on Asphalt Pavements, International Society of Asphalt Pavements, Seattle, Washington, p. 349-362
- [25] Al Hakim, B., L.W. Cheung, and R.J. Armitage [2000]. Use of FWD Data for Prediction of Bonding between Pavement Layers, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 1, N° 1, p. 49-59
- [26] Sangiorgi, C.; Collop A. C. and Thom N. H. [2003]. A Non-Destructive Impulse Hammer for Evaluating the Bond between Asphalt Layers in a Road Pavement, Proceedings, International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Germany.
- [27] Romanoschi, S. A. and Metcalf J. B. [2003]. Errors in Pavement Layer Moduli Backcalculation Due to Improper Modeling of the Layer Interface Condition, Proceedings, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C.
- [28] Canestrari, F.; Ferrotti G.; Partl M. N. and Santagata E. [2005]. Advanced Testing and Characterization of Interlayer Shear Resistance, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. p. 69-78
- [29] Dragomir L. Mihai; Petit Christopher [2011]. Thermal Shrinkage bending test in characterizing reinforcement advantages over bituminous mixtures. Acta technica Napocensis: civil engineering & architecture. Vol. 54 N°1. p. 112-121.
- [30] Ameri-Gaznon, M. and Little D. N. [1990]. Octahedral Shear Stress Analysis of an ACP Overlay on a Rigid Base, Journal of the



Association of Asphalt Paving Technologists, White Bear Lake, Minnesota, Vol. 59.

- [31] Tostiscarelli J. y Godoy A. [1993]. Uso de geotextiles para prevenir reflexión de fisuras en rehabilitación de pavimentos. 7º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Trabajo T3-04. Venezuela.
- [32] Montestruque Vilchez Guillermo E. [2002]. Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflejo de trincas. Tesis Doutoral. São José Dos Campos. Universidad de São Pablo, Brasil.
- [33] Franken A.; Valnestraete L. [2005]. Reflective of Reflective Cracking in Pavements. RILEM Report 18. ISBN: 0-419-22950-7 print edition. Belgian Road Research Centre, Brussels, Belgium. 136 p.
- [34] Rodrigues R. M. [1991]. Estudo do trincamento dos pavimentos. Tese doctorado. Universidad Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro RJ. Brasil.
- [35] Medina J. and Motta L. [2005]. Mecânica dos Pavimentos. Editado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). 2ª Edição. Rio de Janeiro.
- [36] Nunn M. E. [1989]. Una investigación de fisuras en pavimentos compuestos de reflexión en el Reino Unido. Actas de la 1er conferencia sobre reflexión de fisuras en pavimentos. Evaluación y Control. Rilem 1989. pp. 146-153
- [37] De Bondt A. H. [1999]. Anti-reflectante diseño de cracking (reforzado) superposiciones asfálticos. Tesis doctoral. Universidad Tecnológica de Delft. Holanda. ISBN 90-6464-097-1. 335 p.

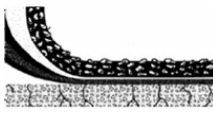


- [38] Moreno Oscar [2010]. Evaluación de la fisuración refleja en una experiencia de repavimentación con concreto asfáltico sobre un pavimento de hormigón. Reunión del Asfalto 2010. Bs As. Argentina.
- [39] Rodrigues, R. M. [2001]. Modelos para Previsão do Desempenho de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários no Brasil. Relatório Final da Pesquisa CNPq, Processo N° 301314/96-9.
- [40] Maroni Laerte G. [1993]. El uso de Geotextiles en repavimentación asfáltica. Una experiencia reciente. Revista Carreteras. Edición N° 140, p. 57-66.
- [41] Ponniah, J.; Vacin O., and Kennepohl G. [2006]. Effectiveness of Tack Coat to Improve Bonding between Asphalt Layers: Laboratory Evaluation, Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Charlottetown, Prince Edward Island, pp. 249-260
- [42] Leng, Z.; Ozer H.; Al-Qadi I. L. and Carpenter S. H. [2008]. Interface Bonding between Hot-Mix Asphalt and Various Portland Cement Concrete Surfaces—Laboratory Assessment, Journal of the Transportation Research Board, No. 2057, Transportation Research Board, Washington, D.C. pp. 46-53
- [43] Singer Fernando L. y Pytel Andrew [2004]. Libro de Resistencia de Materiales. Editorial Alfaomega. ISBN 13 / Cód Barra: 9789701510568. 4ª edición, 584 p.
- [44] Darter M. I. et al, [1994]. Base and subgrade Effects on Concrete Pavement Performance. 3° International Workshop on the Design and Evaluation of Concrete Pavement. Proceeding. CROW Krumbach. pp. 279-290
- [45] Ferreira Da Silva André E. [2003]. Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre



placa de concreto e base cimentada ou asfáltica. Tesis do Laboratório de mecânica de pavimentos/EPUSP. São Paulo. Brasil.

- [46] Álvarez Blanco Francisco [2005]. Materiales poliméricos y Compuestos. Tema 11 intercara fibra-matriz. Escuela de Minas de Oviedo. Laboratorio de Cementos. Principado de Asturias. 59 p.
- [47] Norma Argentina. Norma IRAM 45001 [1998]. Adhesivos, definiciones. Primera edición 28-08-1998.
- [48] Fusco P. B. [1995]. Técnicas de armar as estructuras de concreto. 382 pág. PINI. Sao Pablo. Brasil.
- [49] Shah S. P. y Ahmad S. H. [1994]. High Performance Concretes and Applications. 403 p. 1ed Butterworth, Heinemann, Oxford.
- [50] Madrid Mario [1999]. Tecnología de la adhesión. Departamento Técnico de Loctite España. pp.1-59. España.
- [51] Ferreira Da Silva E. y Montestruque Vilchez G. [2000]. Evaluación del comportamiento de geomallas en el control de reflexión de grietas. Centro Técnico Aeroespacial - Huesker Ltda. Brasil.
- [52] Soto Sánchez José Antonio [2006]. Vida útil. Necesidad de rehabilitación con soluciones innovadoras. Zaragoza, España.
- [53] Alonso Burgos, Antonio J. [2002]. Rehabilitación de firmes. Orden Circular 9/2002. Instrucciones de construcción. Dirección General de Carreteras. España.
- [54] Koerner Robert [2005]. Desing with Geosynthetic. Fifth edition. ISBN: 0-13-145415-3. 818 p.



CAPÍTULO III

EQUIPOS PARA ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LA INTERFASE

Este Capítulo presenta distintos dispositivos de ensayo, diseñados a nivel mundial, con objeto de valorar el fenómeno de la fisuración refleja y la adherencia entre capas. Además se presentan otros equipos que pueden ser adaptados para estudiar la problemática de los pavimentos deteriorados.



III.1 INTRODUCCIÓN

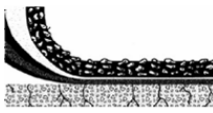
La distribución de tensiones en la estructura de un pavimento es el resultado de una compleja combinación de factores ambientales, condiciones de carga, geometría de la estructura y propiedades de los materiales componentes. Por esta razón se hace difícil contar con un simple dispositivo de ensayo de laboratorio que pueda representar el comportamiento bajo condiciones reales de sollicitación.

Los equipos de ensayos desarrollados, de sollicitación dinámica mayormente, donde la aplicación de la carga o deformación se repite con cierta frecuencia a lo largo de un determinado número de ciclos, presentan una herramienta de fácil implementación y eficaz para caracterizar el comportamiento de los diferentes desempeños de varias alternativas y proporcionar las bases para el criterio de proyecto.

El mejor camino al estudio de los pavimentos deteriorados es por medio del desarrollo de ensayos y procedimientos que simulen aproximadamente las condiciones de campo. De esta forma el desempeño de la capa de refuerzo asfáltico, ante una fisura en desarrollo, puede ser validado de forma comparativa, con vista al control de la reflexión de fisuras cuando se interpone un material geosintético. De forma similar cuando se desea valorar la adherencia entre capas.

III.2 ENSAYOS PARA ESTUDIAR LA PROPAGACIÓN DE FISURAS

Los ensayos acelerados sobre los pavimentos son cada vez más populares en la investigación debido a la capacidad de evaluar el comportamiento de un pavimento en un tiempo mucho más corto, ya que el monitoreo del progreso de una fisura en obra es más complicada por las variables específicas, como control de temperatura, carga, tasa de propagación, entre otros, haciendo de estos ensayos una herramienta fundamental permitiendo la verificación y calibración de la respuesta de un pavimento y los modelos de predicción de rendimiento.



III.2.1 Ensayos de rueda de carga

Van Dijk (1976), citado por [1] [KIM R. and JOON LEE S., 1999], fue quien presentó una rueda de carga en 1975. A partir de aquí varios equipos de simulación de carga han sido desarrollados. Se presentan a continuación los principales equipos desarrollados en este sentido.

III.2.1.1 Wheel Tracking Test (WRC)

Desarrollado por el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Politécnica de Madrid, Figura III.1. La prueba se lleva a cabo a 5 °C, se aplica una tensión de tracción horizontal mediante un micro motor a razón de 0,6 mm/h. Posee un sistema de placas deslizantes que producen una deflexión de 0,45 mm. El desplazamiento de la rueda de carga es de 42 ciclos por minuto. El método se basa en la norma británica BS 598-110.

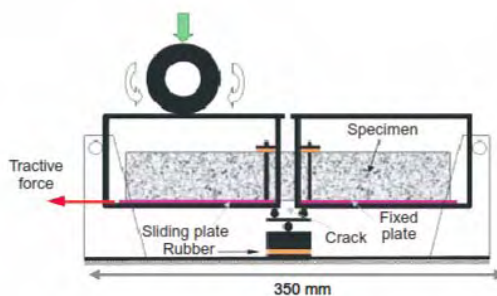


Figura III.1 Wheel Tracking Test (WRC)

Fuente [2] [PRIETO J. N. et al., 2007]

III.2.1.2 Probador Pavement Rutting (LCPC)

Desarrollado por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC). Mide el ahuellamiento de mezclas asfálticas de pavimentación utilizando una goma neumática. Puede ser probado a temperaturas de 30 a 70 °C. La carga aplicada por el neumático es de 5000 N y la velocidad de pasada es de 67 ciclos/min. Este equipo ha sido adaptado por el



Dr. Montestruque G. para analizar el comportamiento de un geosintético en poliéster entre capas asfálticas ante el reflejo de fisura, Figura III.2.

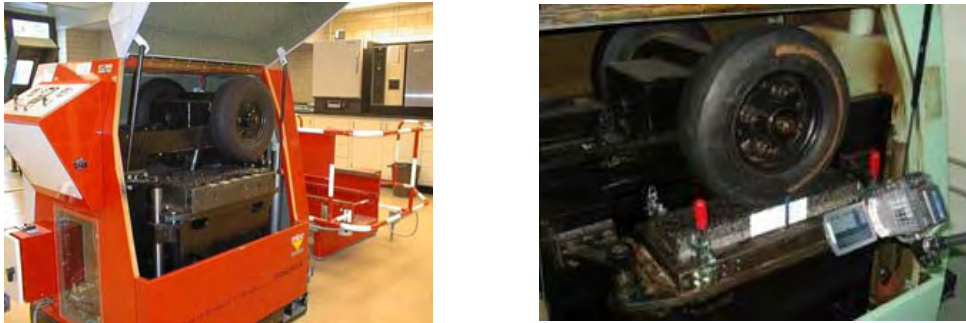


Figura III.2 Probador Pavement Rutting (LCPC)

Fuente [3] [MOSTESTRUQUE G., 2002]

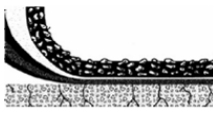
III.2.1.3 Hamburgo Wheel Tracking Device (HWTD)

Desarrollado en Alemania, el equipo mide el ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica haciendo rodar una rueda de acero sobre la superficie de una capa asfáltica que se sumerge en agua caliente (por lo general a 50 °C). La velocidad de la rueda es de 53 ciclos/min. Se aplica una carga de 705 N. Las muestras pueden ser prismáticas o cilíndricas. El equipo puede ser adaptado para estudiar diferentes sistemas anti-reflejo de fisuras, Figura III.3.



Figura III.3 Hamburgo Wheel Tracking Device (HWTD)

Fuente [4] [YETKING Y., 2007]



III.2.1.4 University College of Dublin (UCD)

Este método desarrollado en el 2002 por [5] [GIBNEY et al., 2002] en Irlanda, tiene por objeto valorar diferentes mezclas asfálticas del tipo HMA. El equipo permite analizar la progresión de fisuras ascendentes y descendentes. La muestra se coloca sobre una espuma que simula la base débil y en los extremos dos apoyos de madera. El equipo se utiliza para estudiar la progresión de la fisura en posición de flexión y de corte.

La velocidad de desplazamiento de la rueda es de 21 ciclos/min y se aplica una carga de 520 N. La temperatura de ensayo es de 25 °C, Figura III.4. El método se basa en la norma británica BS 598.

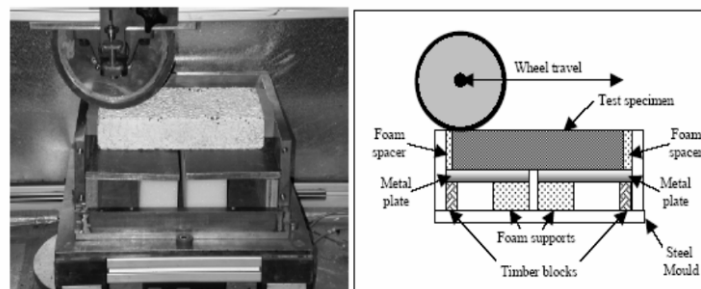


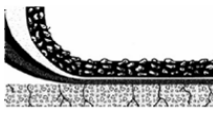
Figura III.4 University College of Dublin (UCD)

Fuente [5] [GIBNEY et al., 2002]

III.2.1.5 Wheel Tracking Test (WTT)

El ensayo consiste en aplicar una carga mediante el paso de una rueda, con cierta frecuencia, nivel de carga y a una temperatura definida de ensayo, determinando la deformación plástica (ahuellamiento de la mezcla asfáltica), Figura III.5.

Existen numerosos equipos de estas características a nivel mundial desarrollados para estudiar el ahuellamiento de diferentes mezclas asfálticas. Los mismos pueden ser adaptados para estudiar el fenómeno de reflejo de fisuras en los pavimentos.



El Wheel Tracking Test (WTT) es el modelo implementado para el desarrollo del presente trabajo de investigación, el mismo se detalla en el Capítulo VII.

El ensayo se basa en el método BS EN 12697-22 (2003) de la Comunidad Europea. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22.

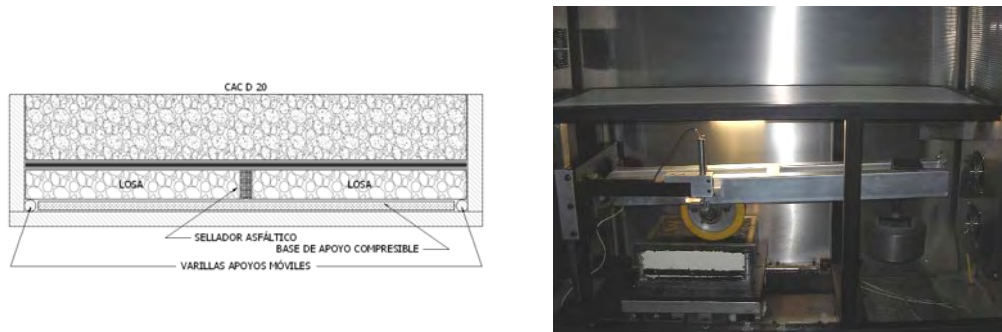


Figura III.5 Wheel Tracking Test (WTT)

La Tabla III.1 presenta un resumen de las características de cada equipo.

Tabla III.1 Características de los equipos de rueda de carga

Características	Equipos				
	WRC	LCPC	HWTD	UCD	WTT
Carga de la rueda (N)	variable	5000	705	520	700
Frecuencia de carga (ciclo/minuto)	43	60	53	21	26,5
Tipo de rueda	caucho	neumática	acero	acero	caucho
Medio de ensayo	aire	aire	agua	aire	aire
Temperatura de ensayo (°C)	58	30 a 70	50	25	60
Espesor de la probeta (cm)	6	10	4	5	5

III.2.2 Ensayos de flexión con carga cíclica

III.2.2.1 Equipo de carga cíclica (ECC)

El ensayo consta en someter una viga a cargas cíclicas tratando de simular el efecto del tránsito. Durante el ensayo la viga descansa sobre



una goma que simula las características semiplásticas de la base, Figura III.6.

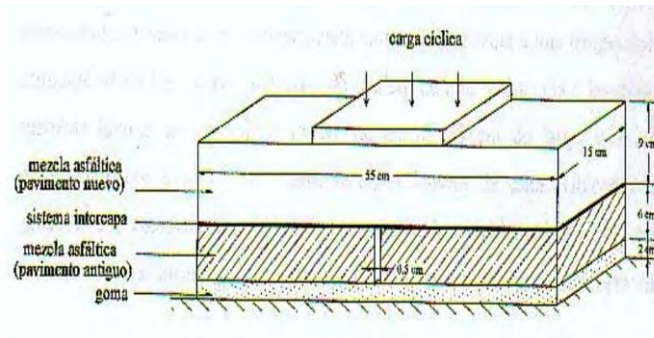


Figura III.6 Equipo de carga cíclica (ECC)

Fuente [6] [PARDO ROJAS M. A. y CANATA ZAROR M. T., 2000]

La carga se aplica en el centro de la viga a través de una placa metálica, la frecuencia utilizada es de 0,2 Hz (5 segundos que corresponde a un vehículo circulando a 20 km/h), la carga máxima alcanzada es de 8,3 kN cada 100 ciclos de carga, se toman los ciclos transcurridos para el inicio de la fisura en la capa de refuerzo, midiendo el avance de la misma hasta que propaga a la superficie de la viga [11] [MARONI LAERTE, 1993].

III.2.2.2 Equipo LRPC D'AUTUN

Desarrollado por el Laboratorio Regional Des Ponts et Chaussees D'Autun (LRPC D'AUTUN), utiliza una probeta de 500 x 110 mm sometida a dos sollicitaciones (tracción/flexión) a 5 °C de temperatura. El equipo realiza ciclos de tracción horizontal a una velocidad de 0,6 mm/hora y relajación que simulan la tracción y contracción térmica, Figura III.7. Al mismo tiempo una flexión vertical cíclica de frecuencia de 1 Hz y de 0,2 mm de flecha es aplicada simulando el tránsito.

La aparición de la fisura es acompañada por sensores laterales. Cuando el coeficiente resulta $< 0,9$ es ineficaz; si se encuentra entre 0,9 y 1,1 resulta medianamente eficaz y si es $> 1,1$ es muy eficaz.



Para ensayos donde se utilizó geotextil embebido es asfalto se obtuvo un coeficiente de 1,5 [12] [BARDASI A. et al., 1995].

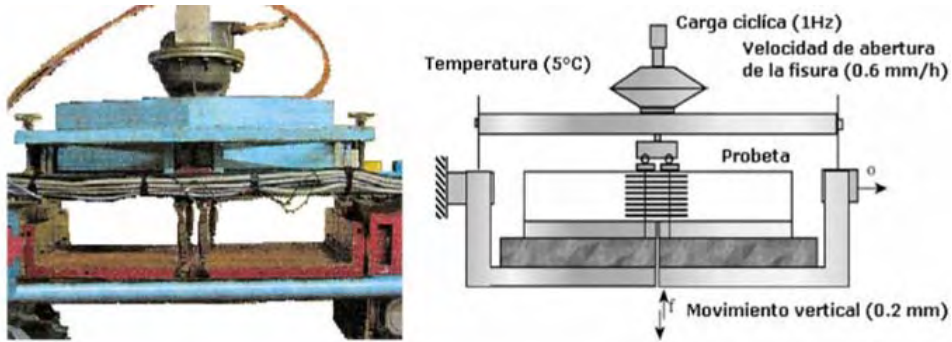


Figura III.7 Equipo LRPC D'AUTUN

Fuente [9] [BRAVO MOLINA L. E. Et al., 2008]

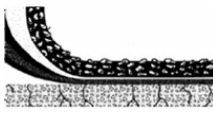
III.2.2.3 Equipo Test Set Up

El equipo Test Set Up presentado por [13] [KHODAII A. et al., 2009] consta de una estructura de pavimento con capas de dimensiones de 380 mm de largo x 150 mm de ancho x 75 mm de altura, Figura III.8. Aplica una carga dinámica en el centro superior de la viga a través de una placa circular de 112 mm de diámetro con una frecuencia de 10 Hz simulando un tránsito a alta velocidad. La carga máxima es de 6,79 kN para simular una carga de la rueda del camión. La temperatura de ensayo es de 20 °C.



Figura III.8 Equipo Test Set Up

Fuente [13] [KHODAII A. et al., 2009]



III.2.2.4 Equipo de carga cíclica IMAE

En Rosario (Argentina), el laboratorio vial IMAE (Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras) diseña un equipo utilizando una probeta de 300 x 100 x 80 mm realizando un análisis mediante elementos finitos. El ensayo se efectúa a flexión con carga pulsante acondicionada a 10 °C aplicando 0,25 seg de carga y 0,75 seg de reposo, Figura III.9.



Figura III.9 Equipo de carga cíclica IMAE

Fuente [14] [MARTINEZ F. y ANGELONE S., 2008]

III.2.2.5 Equipo MEFISTO

El equipo MEFISTO, desarrollado en el 2004 por el laboratorio Regional Ponts et chaussées d'Autun en Francia, tiene como objetivo evaluar la eficiencia de diferentes materiales anti-reflejo de fisuras en pavimentos semi rígidos sometidos a bajas temperaturas, Figura III.10. El ensayo consiste en aplicar una carga de 10 Hz y una carga horizontal. Hasta el momento no han podido aplicar las cargas, vertical y horizontal, simultáneamente. Los resultados presentados de la investigación están relacionados a la carga de flexión. La prueba se lleva a cabo a 5 °C con una carga vertical de 8,5 KN.

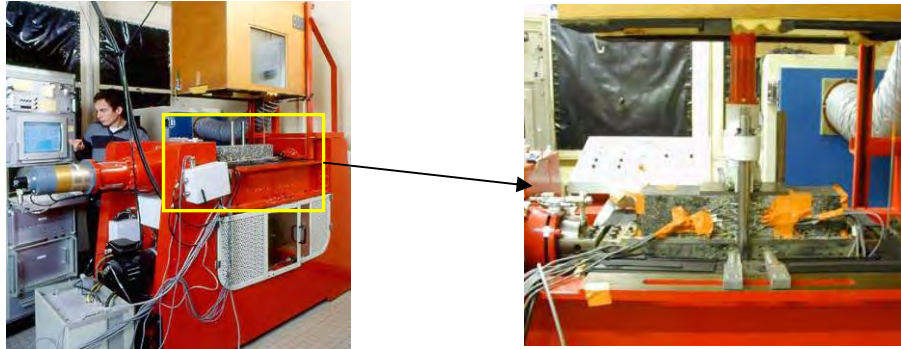


Figura III.10 Equipo MEFISTO

Fuente [15] [TAMAGNI et al., 2004]

III.2.2.6 Equipo MTS (Aeronautical Technological Institute)

Desarrollado en el 2003 por Aeronautical Technological Institute (ATI) de Brasil, Figura III.11.

El equipo consiste en una máquina MTS (Machine and Tractor Station) que aplica una carga cíclica en posición de flexión y de corte sobre vigas prismáticas. La viga esta simplemente apoyada y las cargas variables entre 500 y 300 KN/m², se aplican con una frecuencia de 20 Hz.



Figura III.11 Equipo MTS

Fuente [16] [MONTESTRUQUE G. et al., 2004]

III. 2.2.7 Equipo de carga cíclica LEMaC

Para los estudios de reflejo de fisura se implementa el equipo al que denominamos Módulo de Rigidez (MR), Figura III.12; el mismo se describe en el Capítulo VII.

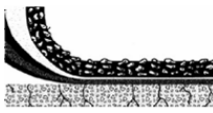


Figura III.12 Ensayo de flexión por carga cíclica

La Tabla III.2 incluye las características fundamentales de estos equipos.

Tabla III.2 Características de los equipos de carga cíclica

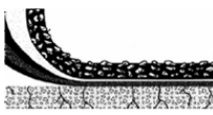
Características	Equipos				
	LRPC/ MEFISTO	Test set up	IMAE	MTS	LEMaC
Frecuencia de carga (Hz)	1/10	10		20	0,5
Tipo de carga	tracción/ flexión	cíclica	cíclica	cíclica	cíclica
Medio de ensayo		Aire			
Temperatura de ensayo (°C)	5	20	10	20	25
Espesor del refuerzo (cm)	5	7,5	5	variable	5

III.3 ENSAYOS PARA ESTUDIAR LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS

Existe en el mundo diferentes equipamientos para poder realizar, mediante una sollicitación de corte, tracción directa y/o por torsión, la valoración de la adherencia entre capas.

III.3.1 Ensayo de corte entre capas

Los ensayos consisten en medir la resistencia al corte en la interfase de dos materiales.



III.3.1.1 Prueba de adhesión de interfase ASTRA

Los autores [17] [SANTAGATA M. y CANESTRARI F., 2005] realizaron ensayos empleando la metodología Ancona Shear Testing que impone desplazamientos relativos entre dos materiales adheridos que inducen, en la interfase, tensiones de corte, Figura III.13. Existe en este caso la posibilidad de aplicar una fuerza normal que simule el peso de la capa de refuerzo. La desventaja de este ensayo es que no se pueden ensayar muestras extraídas de campo.

El equipo permite analizar el efecto de la temperatura y la adherencia en la interfase de los pavimentos. Aplica una carga normal con una velocidad de 2,5 mm/min.

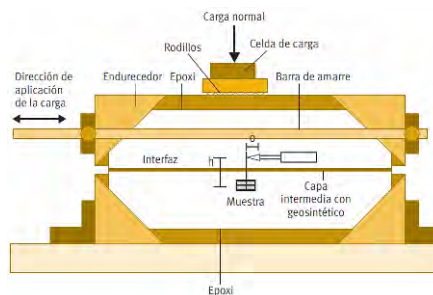


Figura III.13 Ancona Shear Testing Reseach (ASTRA)

Fuente [17] [CANESTRARI F. y SANTAGATA M., 2005];
[18] [CALTABIANO M. y BRUTON J., 1991]

III.3.1.2 Equipos de corte US/BELGE y Swiss LPDS Tester

Estos ensayos surgen como resultado de investigaciones de la IBEF (International Bitumen Emulsion Federation) en 1999. Siguen los lineamientos de la norma SN 671-961 y consta en someter un testigo o probeta a un esfuerzo de corte. Estos equipos fueron implementados para determinar dotaciones mínimas de riego, Figura III.14 y Figura III.15.

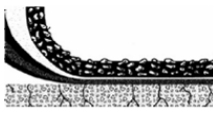


Figura III.14 Ensayo US/BELGE

Fuente [19] [COLLOP A. et al., 2003]; [20] [ABDO J. et al., 2001]

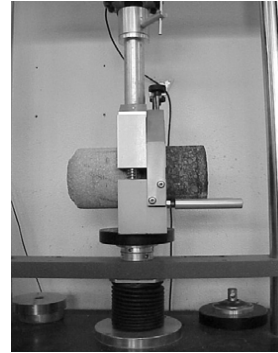


Figura III.15 Swiss LPDS Tester

Fuente [21] [MOLENAAR A., 1993]; [22] [ROFFE J. y CHAIGNON F., 2002]

Las condiciones de ensayo para los equipos son:

Velocidad de carga = 1,27 mm/min

Temperatura de ensayo = de -15 °C a 20 °C

Diámetro de la probeta = 152 mm de diámetro

III.3.1.3 Equipo Superpave Shear Test LTRC

Evalúa diferentes tipos de riegos, con distintas dosificaciones y temperaturas en la interfase. Tiene dos partes que sujetan la probeta, se monta en el interior del equipo y se aplica una carga constante, Figura III.16. El ensayo se realiza a una temperatura entre 25 °C y 55 °C.

El diámetro de la probeta es de 150 mm.

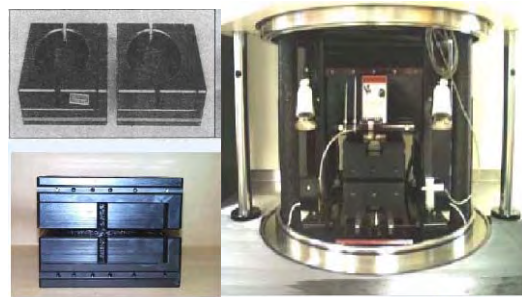
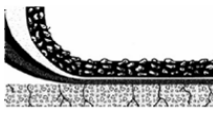


Figura III.16. Superpave Shear Test LTRC

Fuente [23] [MOHAMMAD L. et al., 2002]



III.3.1.4 Equipo de corte FDOT

Desarrollado por Florida Department of Transportation (FDOT), Figura III.17; se utiliza para ensayar la adherencia de emulsiones bajo las siguientes condiciones:

Velocidad de carga = 50,8 mm/min

Temperatura de ensayo = 15 a 35 °C

Diámetro de la probeta = 150 mm



Figura III.17 Aparato de corte FDOT

Fuente [24] [SHOLAR et al., 2004]; [25] [WEST R. et al., 2005]

III.3.1.5 Equipo de adherencia EAZB

La muestra se fabrica en tres capas de mezcla asfáltica con geosintético entre ellas. Aunque esta configuración no corresponde a la utilizada en los caminos, ayuda a determinar la adherencia entre geosintético y mezcla asfáltica, Figura III.18.

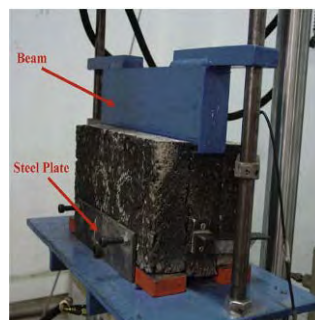


Figura III.18 Equipo de adherencia EAZB

Fuente [26] [ZAMORA BARRAZA et al., 2010]



III.3.1.6 Equipo de adherencia Slant Shear Test (SST)

El ensayo de corte puro Slant Shear Test mide, al igual que los métodos anteriores, la resistencia al corte en la interfase de dos materiales que se dislocan bajo un ángulo entre 30° y 45° , Figura III.19 y Figura III.20.

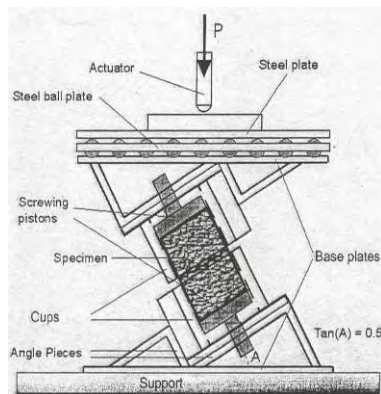


Figura III.19 Slant Shear Test 30° (SST)

Fuente [28] [ROMANOSCHI S. y METCALF, 2001]

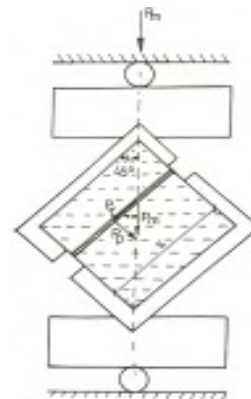


Figura III.20 Slant Shear Test 45°

Fuente [29] [GRZYBOWSKA W., et al., 1993]

El ensayo está regido por la Norma ASTM C882-91 [27] [FORTES R. M., 1999]. La velocidad de carga es de 4,7 mm/min. El diámetro de la probeta es de 76,2 mm.

III.3.1.7 Ensayo de corte WHEAT

[30] [WHEAT M., 2007] implementa el equipo de corte donde utiliza el concepto de Romanoschi y Grzybowska, Figura III.21.

El ensayo consiste en determinar el esfuerzo de corte entre dos materiales dislocados entre 20° y 30° . La diferencia radica en las dimensiones de la probeta, utilizando testigos calados en obra de 101,6 mm de diámetro.

La velocidad de aplicación de carga es de 3 mm/min; la temperatura de ensayo es de 20°C .

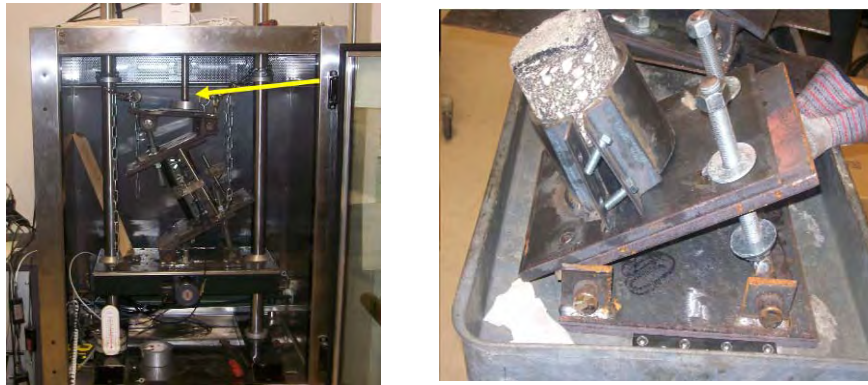


Figura III.21 Ensayo de Corte 20° - 30°

Fuente [30] [WHEAT M., 2007]

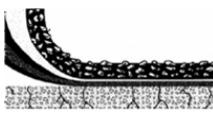
III.3.1.8 Ensayo de corte Francesio

En la Argentina, el Ing. Carlos Francesio, presentó en el año 1969 en la XI Reunión del Asfalto, un trabajo en el que desarrolló un ensayo de corte utilizando elementos de la prensa Marshall para evaluar la adherencia entre capas de pavimentos flexibles. Dicho ensayo consta de someter a testigos o probetas confeccionadas en laboratorio a un esfuerzo de corte por flexión y calcular la tensión de adherencia que se genera en el plano de discontinuidad, Figura III.22.



Figura III.22 Ensayo de corte Francesio

Fuente [31] [MIRO RECASENS R., 2005]



III.3.1.9 Ensayo de corte LCB

Siguiendo los lineamientos de Francesio, el Ing. Ricci Luis valora en su tesis de maestría la adherencia entre capas al interponer un Geotextil No Tejido; por ello, se decide utilizar el equipamiento disponible para los ensayos de adherencia interponiendo diferentes grillas poliméricas entre capas.

La Figura III.23 presenta el equipo empleado, el procedimiento y características del ensayo se describen en Capítulo VII. Por su parte, la Tabla III.3 incluye las características esenciales de los equipos para determinar adherencia por corte.

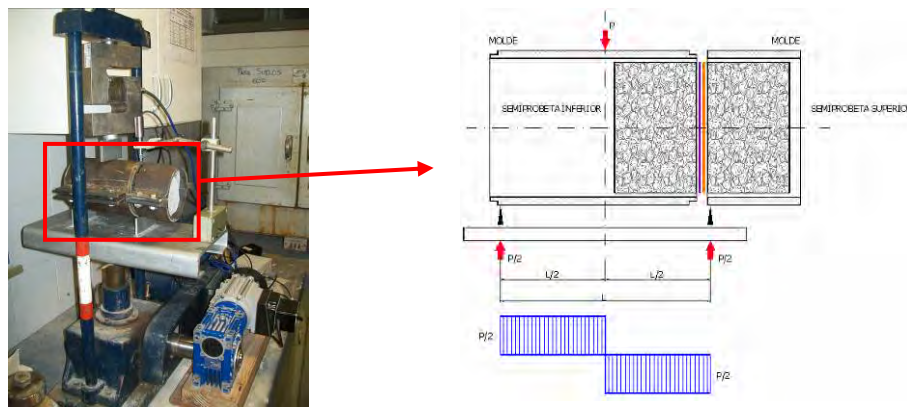


Figura III.23 Ensayo de corte LCB

Fuente [32] [RICCI L., 2011]

Tabla III.3 Características de los equipos de adherencia por corte

Características	Equipos				
	FDOT	BELGE/LPDS	LTRC	WHEAT	LCB
Frecuencia de carga (mm/min)	50,8	1,27	222N/min	3	1,27
Tipo de carga	corte	corte	corte	corte a 30°	corte por flexión
Temperatura de ensayo (°C)	15 - 35	15 - 20	25	20	20 - 24
Diámetro de la probeta (mm)	150	152	150	101,6	101,6



III.3.2 Ensayos de tracción directa

El ensayo permite determinar la resistencia de adherencia entre dos capas, aplicando la carga en forma perpendicular al plano de la interfase. El dispositivo empleado para la realización de este ensayo consiste en dos mordazas que permiten sujetar la probeta y un equipo que genere tracción.

III.3.2.1 Ensayo de tracción directa DT

El objetivo del ensayo es caracterizar y evaluar la ductilidad y la resistencia a la fatiga de asfalto, Figura III.24. Las condiciones son las siguientes:

Velocidad de carga = 1,27 mm / min.

Temperatura = 20 °C

Dimensiones = 100 mm de diámetro por 150 mm de altura

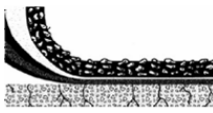


Figura III.24 Ensayo de tracción directa DT

Fuente [\[33\]](#) [WALUBITA L. F., 2010]

III.3.2.2 Ensayo de tracción ENDACMA

El ensayo permite determinar la adherencia de un riego de adherencia aplicado entre dos capas asfálticas, Figura III.25. Las condiciones de ensayo son las siguientes:



Temperatura: -5°C , $+25^{\circ}\text{C}$

Velocidad de ensayo: 60 mm/min

Dimensiones = 101,6 mm

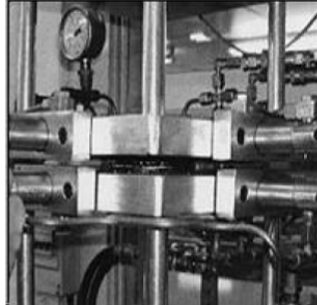


Figura III.25 Ensayo de tracción ENDACMA

Fuente [34] [CALISTO ALVAREZ C., 2007]

III.3.2.3 Ensayo de tracción IMAE

Este ensayo de tracción fue desarrollado por la Universidad de Rosario, Laboratorio Vial del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) para determinar la adherencia de un riego de liga, Figura III.26. Las condiciones de ensayo son las siguientes:

Temperatura de ensayo = 25°C

Velocidad de deformación = 5 mm/min

Dimensiones = 101,6 mm

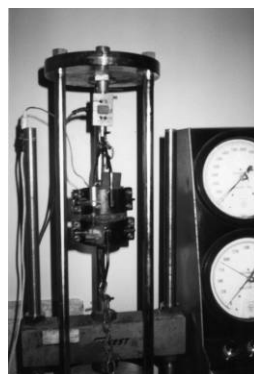


Figura III.26 Ensayo de tracción IMAE

Fuente [35] [BUONO F., 2008]



III.3.2.4 Ensayo de tracción directa LEMaC

Se implementa el ensayo de tracción directa, mediante el equipo EMIC DL 10000, realizándose experiencias para valorar la adherencia entre capas con y sin la introducción de un material geosintético, Figura III.27.

Las condiciones de ensayo adoptadas son:

Temperatura = 22+/- 2°C

Velocidad de ensayo = 1,27 mm/min.

Dimensiones = 101,6 mm de diámetro por 100 mm de altura.

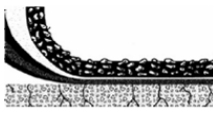


Figura III.27 Ensayo por tracción directa

La Tabla III.4 incluye las características esenciales de los equipos para determinar adherencia por tracción.

Tabla III.4 Características de los equipos de adherencia por tracción

Características	Equipos			
	DT	ENDACMA	IMAE	LEMaC
Frecuencia de carga (mm/min)	1,27	60	5	1,27
Tipo de carga	tracción	tracción	tracción	tracción
Medio de ensayo	aire	aire	aire	aire
Temperatura de ensayo (°C)	20	-5 a 25	25	20 - 24
Dimensiones (diámetro/altura en mm)	100/150	-	100/100	101/100



III.4 REFERENCIAS

[1] Joon, Lee S. and Kim, Richard [1999]. Development of fatigue cracking test protocol and life prediction methodology using the third scale model mobile loading simulator. North Carolina State University. USA. Publication of RILEM pro037-004.

[2] Prieto J. N. et al. [2007]. Application of the wheel reflective cracking test for assessing geosynthetics in anti-reflection pavement cracking systems. Geosynthetics International. España. Vol. 14, N°5, pp. 287-297

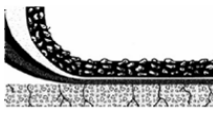
[3] Montestruque Vilchez Guillermo E. [2002]. Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflejo de trincas. Tesis Doutoral. São José Dos Campos. Universidad de São Pablo, Brasil.

[4] Yetking Y. et al. [2007]. Hamburg wheel tracking data base analysis. Texas transpor institute. The texas A&M University system. College station, Texas. Report 0-1707-7.

[5] Gibney A.; Lohan G.; and Moore V. [2002]. Laboratory Study of Resistance of Bituminous Overlays to Reflective Cracking, In Transportation Research Record 1809, TRB, National Research Council pp. 184-190.

[6] Pardo Rojas, Marcos A.; Canata Zaror, Maria Teresa [2000]. Malla metálica para la reflexión de grietas en recapado asfáltico. Chile.

[7] Zhou F.; Chen D.; Scullion T.; Williammee R. [2004]. Overlay tester: a simple test to evaluate the reflective cracking resistance of asphalt mixtures. 5ta International RILEM Conference on Reflective Cracking and Pavements. ISBN: 2-912143-47-0. pp 597-604.



- [8] Pickett, D.L. and Lytton R. L. [1983]. Laboratory Evaluation of Selected Fabrics for Reinforcement of Asphalt Concrete Overlays. Report No. FHWA-TX-84+261-1. Texas Transportation Institute, College Station, Texas.
- [9] Bravo Molina L. E. et al. [2008]. Capas anti-reflejo de fisuras en pavimentos. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico mecánicas. Bucaramanga, Colombia. 194 p.
- [10] Francesio Carlos [1989]. Control de la fisuración refleja. Boletín 096, publicado por la Comisión Permanente del Asfalto (CPA) en el XI CILA (Congreso Ibero-Latinoamericano del asfalto).
- [11] Maroni Laerte G. [1993]. El uso de Geotextiles en repavimentación asfáltica. Una experiencia reciente. Revista Carreteras. Edición N° 140, Págs. 57-66. España.
- [12] Bardasi Alberto et al. [1995]. Aplicaciones de los geotextiles en explanadas y capas de firme. Revista Rutas N°50 ISSN: 1130-7102. Septiembre 1995. España.
- [13] Khodaii Ali; Fallah Shahab; Nejad Fereidoon Moghadas [2009]. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays. Geotextiles and Geomembranes 27 pág. 1–8. ELSEVIER
- [14] Martínez Fernando y Angelone Silvia [2008]. Desarrollo de un equipo de ensayo para valorar la resistencia a la reflexión de fisuras de mezclas asfálticas. XXXV Reunión del asfalto. Rosario, Argentina.
- [15] Tamagni P.; Wendling L.; and Piau J. M. [2004]. A new explanation of pavement cracking from Top to Bottom: The visco-elasticity of asphalt materials. Cracking in Pavements, Mitigations Risk Assessment and Prevention. Proceeding of the fifth International RILEM Conference. Lomoges, France. pp. 425-432.



[16] Montestruque G.; Rodrigues R.; Nods M. and Elsing A. [2004]. Stop of reflection crack propagation with the use of pet geogrid as asphalt overlay reinforcement. Cracking in pavement, Mitigation, Risk Assessment and Prevention. Proceeding of the fifth International RILEM Conference. Lomoges, France. pp. 231-238.

[17] Canestrari F.; Santagata M.; Ferrotti G.; Parti M., [2005]. Repeatability of interlayer Shear Resistance determined with two Test Procedures. Third international SIIV Congress. Societa Italiana Infraestructure Viarie. pp 1-20. Italia.

[18] Caltabiano, M. A. and Brunton, J. M. [1991]. Reflection Cracking in Asphalt Overlays, Asphalt Paving Technology: Proceedings-Association of Asphalt Paving Technical Sessions.USA: Assoc. of Asphalt Paving Technologists.

[19] Collop, A.C.; Sewell, A. J. and Thom, N.H. [2003]. Laboratory assessment of the resistance to crack propagation in high stiffness asphaltic materials. Submitted to IMechE Journal of Materials: Design and Applications.

[20] Abdo J., et al. [2001]. L'étude du collage d'un BBTM sur un revêtement en béton âgé de quelques jours. Un nouveau project de recherche fruit du partenariat CIMBETON/SPECBEA/SNBPE. Revue Générale des Routes, No. 798, pp. 22-28.

[21] Molenaar A.A.A. [1993]. Evaluation of pavement Structure with emphasis on reflective Cracking, proceeding of the Second international conference of reflective cracking in pavement. RILEM. pp 21-48.

[22] Roffe, J. C.; Chaignon F. [2002]. Characterization test of bond costs: Worldwide study, Impact, Test and Recommendation. 3rd International Conference Bituminous Mixture and Pavements. Thessaloniki.



[23] Mohammad, L. N.; Abdur Raqib, M. and Huang, B. [2002]. Influence of asphalt tack coat materials on interface shear strength. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1789, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 56-65.

[24] Sholar et al. [2004]. Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coat. Reunión anual y sesiones técnicas de la asociación de tecnólogos de pavimentos asfálticos. Estados Unidos.

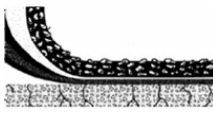
[25] West, R. et al; [2005]. Evaluation of bond strength between pavement layer, NCAT Report 05-08.

[26] Zamora Barraza, David et al. [2010]. New procedure for measure adherente between a geosynthetic material and a bituminus mixture. Geotextiles and Geomembrane. Vol 28. pp 483-489.

[27] Fortes R. M. [1999]. Estudo da adherencia entre placas de concreto de cimento Portland e concretos asfálticas para fins de reforços ultradelgados de pavimentos. Tese doutorado. Escola politécnica. 335 p. Sao Pablo. Brasil.

[28] Romanoschi S. A.; Metcalf J. B. [2001]. Characterization of asphalt concrete layer interfase. In transportation Reseach Record: Journal of transportation Research Borad, N° 1778. TRB. National Research Council, Washington D. C. Pp 132-139.

[29] Grzybowska W.; Wojtowicz J. and Fonferko L. C. [1993]. Application of geosunthetic to overlay in Cracow Region of Poland. RILEM. Proceeding of the Second International RILEM Conference. Inglaterra.



[30] Wheat Maurice [2007]. Evaluation of bond strength at asphalt interfaces. B.S. Kansas Estate University. Master os Science. Manhattan, Kansas.

[31] Miro Recasens, Rodrigo; et al. [2005]. Evaluation of the effect of heat-adhesive emulsion for tack coast with shear test from the road research laboratory of Barcelona. Transportation Research Board.

[32] Ricci L. A. [2011]. Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercala de geosintético. Tesis de maestría en ingeniería del transporte, orientación vial de la FIUBA. Argentina.

[33] Walubita L.F., et al. [2010]. Characteristing the ductility and fatigue crack resistance potential of asphalt mixes based on the laboratory direct tensile strength test. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. ISSN 1021-2019. Vol. 52 N °2. Midrand.

[34] Calisto Álvarez Cristian F. [2007]. Estudio experimental de la resistencia de la adherencia entre capas en la construcción de carpetas asfálticas en caliente. Departamento de Ingenieria Civil. Universidad de Chile.

[35] Bueno Fernando [2008]. Calculo estructural de pavimentos mediante la técnica de elementos finitos, su empleo en el análisis del comportamiento del riego de liga. Tesina de maestría de ingeniería vial. Universidad Nacional de Rosario. Argentina.



CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Este Capítulo aborda la emulsión como ligante entre los materiales componentes del sistema multicapa; se definen las emulsiones asfálticas y se resaltan sus principales características y propiedades básicas. Se clasifica y caracteriza la emulsión seleccionada para la investigación bajo normativa IRAM.

Se realizan ensayos de Tensión superficial (T_s), Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), Potencial zeta (P_z), Concentración de Hidrógeno (pH) y ángulo de contacto para estudiar el comportamiento de la emulsión sobre el hormigón y como vehículo responsable de la unión entre el material geosintético y la losa de hormigón.



IV.1 INTRODUCCIÓN

Los riegos de adherencia son ligeras aplicaciones de asfalto que se aplican entre las capas que constituyen un paquete estructural. Dichos riegos se aplican con el fin de lograr una buena adherencia y prevenir el deslizamiento de las capas estructurales que se encuentran sometidas a esfuerzos tangenciales debidos al tránsito y a los efectos provocados por los cambios climáticos [1] [BRACHO C. 2005].

Se desarrollan y fabrican con objeto de adherirse a los agregados pétreos que conforman un pavimento. No hay estudios relativos al comportamiento de una emulsión, en la interfase de las capas que se desean unir cuando entra en contacto con materiales geosintéticos.

Actualmente las emulsiones se encuentran en continuo desarrollo buscando la mejor afinidad con los agregados pétreos y mayor durabilidad; los últimos desarrollos contemplan la adhesividad con los neumáticos.

Se seleccionan como punto de partida, tres emulsiones asfálticas: de Imprimación (EAI), de Rotura Rápida Modificada con polímero (ECRR-M) y Termo-adherente (ETRAD), las cuales son provistas por una importante empresa nacional.

En cuanto al origen de la emulsión asfáltica, se puede mencionar que el asfalto puede obtenerse en forma natural o como residuo de la destilación del petróleo, Figura IV.1, Figura IV.2 y Figura IV.3. Para utilizarlos en la construcción de caminos (construcción y mantenimiento de pavimentos) es necesario reducir su viscosidad [1] [BRACHO C., 2005]; para ello se realizan diferentes procedimientos:

- Por simple calentamiento hasta la temperatura deseada (técnica en caliente); se emplea en carpetas asfálticas.



- Por disolución en solventes derivados del petróleo (ligantes asfálticos diluidos); la velocidad de endurecimiento está dada por los solventes utilizados (nafta, gas oil o kerosén).
- *Por emulsificación en agua, con ayuda de agentes tensioactivos; se obtiene así las llamadas emulsiones asfálticas.*

Fracción	Punto de Ebullición (°C)	Cantidad de átomos de carbono en la cadena	Usos
Gas	Hasta 40	1 - 5	Gas Licuado 
Gasolina (Benzina)	40 - 180	6 - 10	Combustibles 
Queroseno	180 - 230	11 - 12	Calefacción doméstica (parafina) 
Aceites ligeros	130 - 305	13 - 17	Motores Diesel y hornos a petróleo 
Aceites pesados	305 - 405	18 - 25	Lubricantes de Motores 
Visierina	405 - 515	26 - 38	Cremas 
Alquitranes y Asfaltos	sobre 515	39	Pavimento 

Figura IV.1 Esquema destilación del petróleo



Figura IV.2 Planta de destilación



Figura IV.3 Obtención del asfalto en forma natural

Las emulsiones asfálticas fueron desarrolladas en los comienzos siglo XX cuando el químico Hugh Alan Mackay obtuvo una patente sobre emulsiones de betún. Se utilizaron originalmente como riego (“spray applications”) y como paliativo de polvo (“dust paliatives”).

Actualmente han afianzado su uso en riegos de liga por constituirse en una tecnología “limpia” desde el punto de vista ambiental en comparación con los asfaltos diluidos, según Musuruana 1988 citado por [2] [RICCI L., 2011]. Estos últimos han perdido mercado por ser considerados



contaminantes, ya que liberan solventes al ambiente. Esta situación brinda además ventajas técnicas, económicas, ecológicas y de seguridad.

IV.2 DEFINICIÓN

El Instituto del Asfalto (Asphalt Institute) y la Asociación de Fabricantes de Emulsiones Asfálticas (AEMA - Asphalt Emulsion Manufacturers Associations) definen a la emulsión asfáltica para uso vial como aquella emulsión de betún asfáltico en agua que contiene pequeñas cantidades de agente emulsificante; una emulsión es un sistema heterogéneo que contiene dos fases normalmente inmiscibles (asfalto y agua), donde el agua forma la fase continua de la emulsión y la fase discontinua está constituida por pequeños glóbulos de asfalto. Los asfaltos emulsificados pueden ser de tipo aniónico, catiónico o no iónico, según el tipo de agente emulsificante empleado [3] [THE ASPHALT INSTITUTE, 1973].

Becher P. (1972) citado por [4] [FERRE FRANQUET, 2005] define la emulsión como un sistema heterogéneo termodinámicamente inestable, formado al menos por dos fases líquidas no miscibles, de las cuales una está dispersa en la otra bajo la forma de pequeñas gotas (glóbulos) cuyo diámetro es en general superior a 0,1 μm . Tal sistema posee una estabilidad mínima que puede aumentarse por adición de agentes apropiados, tales como tensioactivos (emulsificantes).

IV.3 CONSTITUYENTES

Una emulsión tiene tres ingredientes básicos [3] [THE ASPHALT INSTITUTE, 1973]: betún asfáltico, agua y un agente emulsificante. En algunas ocasiones el agente emulsificante puede contener un estabilizador. En aplicaciones especiales se agrega un ingrediente más, el polímero.

Para que una emulsión tenga estabilidad en el tiempo, es necesario adicionarle agentes tensioactivos; éstos son compuestos químicos con



cierta actividad superficial que cuando se disuelven en un líquido, en particular en agua, reducen la tensión superficial.

IV.3.1 Betún asfáltico

El betún asfáltico representa entre el 55 y el 70% de la emulsión. Su comportamiento depende de su composición química, de su procedencia y del proceso de refinación.

El asfalto es un material anisotrópico e in-homogéneo; se considera un coloide compuesto de varias fracciones, siendo las principales los asfaltenos (micelas cercanas a la micra) y los maltenos (fase acuosa de alta viscosidad). Los asfaltenos son la fase dispersa del asfalto, mientras que los maltenos son la fase continua, Tabla IV.1. Numerosas investigaciones han establecido que los asfaltenos suministran la dureza, mientras que los maltenos confieren adhesividad y ductilidad.

Tabla IV.1 Componentes básicos del asfalto

Elemento básico	Peso Molecular (g./mol)
Asfaltenos	4000 – 7000
Maltenos	600 – 1000
Resinas	1000 – 2000
Aceites aromáticos	2000 – 4000

Fuente [\[3\]](#) [THE ASPHALT INSTITUTE, 1973]

IV.3.2 Agua

El segundo ingrediente en cantidad es el agua. No puede restarse importancia a su contribución para dotar al producto final de propiedades deseables. El agua humedece y disuelve, se adhiere a otras sustancias y modera las reacciones químicas; estos factores permiten la producción de una emulsión satisfactoria. Por otro lado, el agua puede contener minerales (calcio, magnesio, etc.) u otras sustancias que afectan indeseablemente las propiedades de la emulsión.



IV.3.3 Agentes emulsificantes

Los agentes de superficie, conocidos como emulsionantes, surfactantes o tensioactivos, contienen en su molécula uno o varios grupos hidrofílicos (u oleofóbicos) que pueden ser de tipo iónico o no iónico; además, tienen una estructura hidrocarbonada (o hidrofóbica) [5] [GIUDICE C., 2010].

La porción hidrofílica de la molécula es soluble en líquidos polares mientras que el otro extremo lo es en los no polares. Éstos poseen la propiedad de disminuir la tensión de interfase.

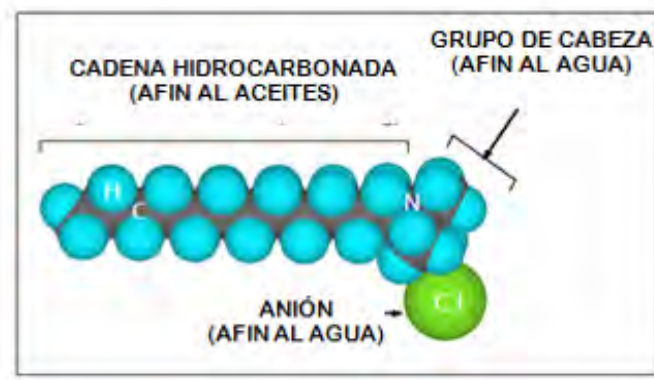


Figura IV.4 Molécula de emulsificante catiónico

Fuente: [6] [TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2006]

Las propiedades de una emulsión dependen del producto químico usado como emulsificante. El emulsificante mantiene los glóbulos de asfalto en suspensión estable y permite su rotura oportuna. El emulsificante cambia la tensión superficial en la interfase, es decir en el área de contacto entre los glóbulos de asfalto y el agua. Estos deben seleccionarse por su compatibilidad con el betún asfáltico usado, Figura IV.7.

Un agente tensioactivo se considera como humectante cuando favorece la mojabilidad de la superficie de un sólido por parte de un líquido [7] [SALAGER J. L. 1992].



IV.3.3.1 Emulsificantes aniónicos

Los emulsificantes aniónicos son los que ionizan en solución acuosa para dar origen a iones orgánicos cargados negativamente; éstos son los responsables de la actividad superficial. Entre ellos se encuentran las sales alcalinas de ácidos grasos; sales metálicas de ácidos grasos y sales de base orgánica y de ácidos grasos.

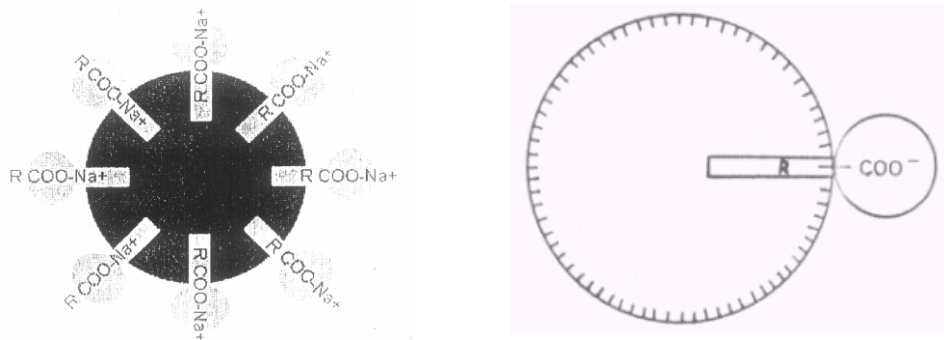


Figura IV.5 Emulsión aniónica

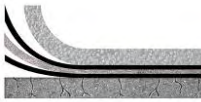
Fuente [8] [SOENGAS C., 2006]

Las más utilizadas son las sales alcalinas de ácidos grasos. La formulación general es:



siendo R- la cadena característica del ácido graso, la cual constituye la parte apolar de la molécula; es lipofílica, es decir que tiene afinidad por las grasas. El grupo -COO^- constituye la parte polar hidrofílica, es decir que presenta facilidad para absorber agua.

En solución, en la fase acuosa continua, la molécula de jabón se disocia generando los iones Na^+ o K^+ afines al agua mientras que el resto de la molécula (R-COO^-) resulta afín a los glóbulos del betún [8] [SOENGAS C., 2006].



Algunos emulsificantes aniónicos, los que son suministrados en forma neutra y por lo tanto insolubles en agua, necesitan ser estabilizados con amoníaco o hidróxido de potasio o de sodio [9] [AKZO NOBEL, 1999].

IV.3.3.2 Emulsificantes catiónicos

La mayoría de los emulsificantes catiónicos son aminas grasas (diaminas, imidazolinas y amidoaminas). Las aminas son convertidas en jabón por reacción con un ácido, generalmente clorhídrico. Otro tipo de agente emulsificante es la sal cuaternaria de amonio Figura IV.6.

Los emulsificantes catiónicos son los que ionizan en solución acuosa y originan los iones orgánicos cargados positivamente responsables de la actividad superficial. Los tensioactivos más utilizados son: Alquilaminas; Alquilamidoaminas y Heterociclos nitrogenados de tipo imidazolina.

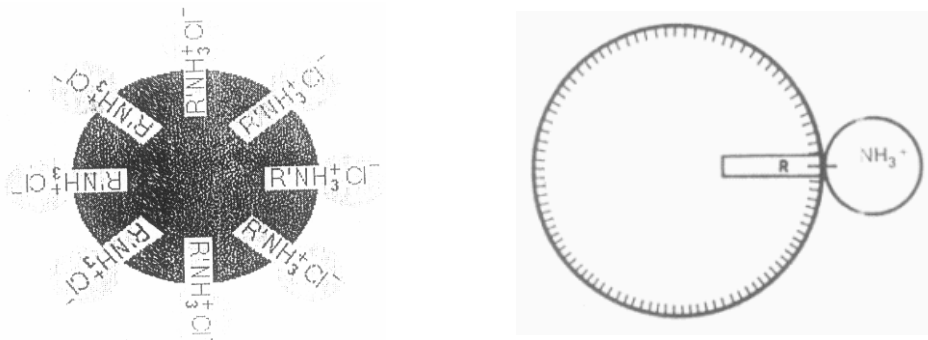


Figura IV.6 Emulsión catiónica

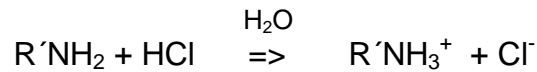
Fuente [8] [SOENGAS C., 2006]

Éstos reaccionan solos o en asociación y deben estar en forma de sales. Como radical hidrocarbonado, la mayor parte de estas moléculas poseen un átomo de nitrógeno cargado positivamente, tanto sean compuestos alifáticos (grupos de compuestos orgánicos que se caracterizan porque los átomos de C que los constituyen se disponen en cadena recta o ramificada: heptano, propano, butano, etc.) como heterocíclicos (compuestos con una estructura de anillo cerrado constituida de 5 ó 6 miembros, en la cual uno o más de los átomos del anillo es un elemento



distinto del carbono: piridina, la que tiene sustituido un carbono por un átomo de nitrógeno).

El emulsificante define el tipo de emulsión, cuando éste actúa en un medio acuoso se disocia resultando:

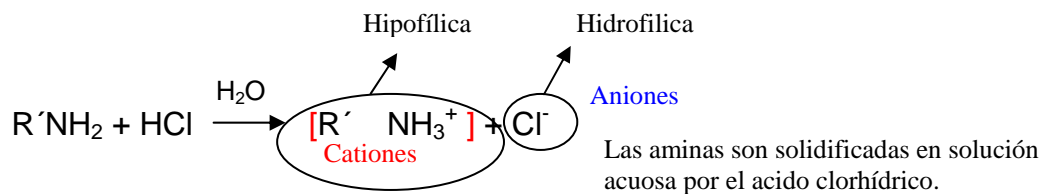


siendo R' la cadena hidrocarbonada característica de la superficie activa; es la parte hidrófoba o hidrofóbica de la molécula (significa que es incapaz de unirse o mezclarse con el agua).

El grupo amino $NH_3^+ Cl^-$ constituye la parte hidrófila o hidrofílica (significa que tiene afinidad con el agua).

En solución de la fase acuosa, las moléculas de jabón se disocian y producen los cationes $R' NH_3^+$ y los aniones Cl^- [8] [SOENGAS C., 2006].

El jabón catiónico en solución acuosa se disocia de la siguiente manera:



Como se puede ver en la ecuación indicada, algunos emulsificantes catiónicos que son suministrados en forma neutra insolubles en agua necesitan ser estabilizados con un ácido como el clorhídrico, fosfórico, acético o sulfúrico antes que su forma catiónica sea generada [9] [AKZO NOBEL, 1999].

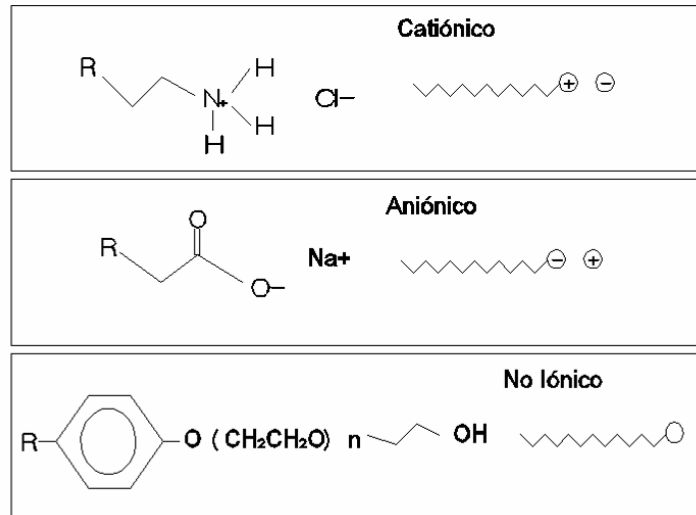
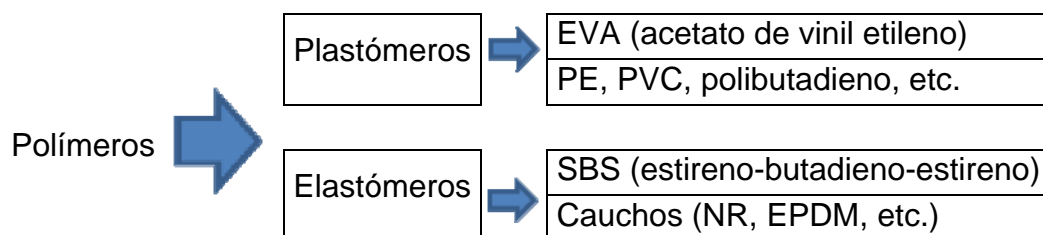


Figura IV.7 Tipos de emulsificantes

IV.3.4 Polímero

El polímero se lo utiliza generalmente en forma de látex con objeto de modificar la emulsión; tiene la propiedad de dar mayor flexibilidad al asfalto y evitar la penetración de los rayos ultravioletas, retardando su oxidación y por lo tanto su deterioro prematuro.

El EVA (etil vinil acetato), el látex SBR (estireno butadieno caucho), el policloropreno, el látex de caucho natural y el SBS (estireno butadieno estireno) son los comúnmente utilizados en la pavimentación [10] [ACHA H. y HERNANDEZ J., 2005].



La incorporación de un polímero (sustancia macromolecular con propiedades viscoelásticas) a un asfalto da lugar a interacciones entre las moléculas del primero y los componentes del segundo y produce alteraciones en el sistema coloidal del asfalto, con el consiguiente cambio de propiedades.



IV.3.5 Otros componentes

Las emulsiones pueden contener otros elementos en proporciones menores, entre los cuales se puede mencionar:

- *Cloruro de calcio*: se incluye en la emulsión en un 0,1% a 0,2% para reducir la ósmosis de agua en el asfalto y reducir al mínimo los cambios en la viscosidad.
- *Cloruro de sodio*: se emplea en emulsiones aniónicas.
- *Solventes*: pueden contener hasta un 15% de solvente para mejorar las características de trabajabilidad y estabilidad al almacenamiento durante la vida de las mezclas asfálticas.

La Tabla IV.2 muestra una relación porcentual del contenido aproximado de los distintos ingredientes que componen una emulsión asfáltica.

Tabla IV.2 Composición de las emulsiones asfálticas

Elemento	Emulsión normal	Emulsión modificada con polímero
Betún asfáltico	40 - 70	50 - 70
Estabilizante	0,2 - 1,5	0,2 - 1,5
Agua	40 - 60	35 - 45
Polímero	0	1 - 4

Fuente [\[3\] \[THE ASPHALT INSTITUTE, 1973\]](#)

Las características físicas resultantes del compuesto asfalto-polímero dependen del tipo de asfalto, cantidad y tipo de polímero, de la compatibilidad entre los componentes, del proceso de mezclado y las historias térmicas de los materiales.

Para asfaltos en los que se utiliza polímeros es conveniente que éstos tengan bajos contenidos de asfaltenos (parte pesada) y poseer suficiente cantidad de aceites aromáticos para disolver el polímero a la temperatura de mezclado y obtener la morfología apropiada para la aplicación particular [\[11\] \[RODRIGUEZ TALAVERA et al., 2001\]](#).



Migliacci y Zambrano (1999), citados por [1] [BRACHO C., 2005], argumentan que las emulsiones catiónicas poseen mayor y mejor capacidad de adherencia que las aniónicas.

IV.4 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones asfálticas se pueden clasificar según el signo de la carga de las gotas de asfalto en catiónica, aniónica o no iónica, de acuerdo a su reactividad y tiempo de rotura en rápida, media, lenta y superestable.

Las emulsiones catiónicas son aquellas en donde las gotas se cargan positivamente, y por lo contrario, en las emulsiones aniónicas las gotas de asfalto adquieren carga negativa, Figura IV.8. Las no iónicas dependen del emulsificante, estas tienen un uso reducido.

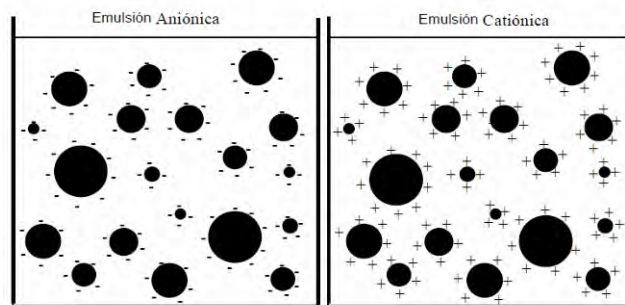


Figura IV.8 Clasificación de las emulsiones por carga

Los sustratos (principalmente los agregados) suelen asumir una carga eléctrica en superficie cuando están en contacto con el agua que depende de la naturaleza de los minerales, el pH y la presencia de sales solubles. Los agregados con alto contenido de sílice tienden a adoptar carga negativa. Por otro lado los agregados básicos como la piedra caliza pueden adoptar carga positiva, Figura IV.9.

Valores de pH próximos a 7 proporcionan mejores adhesividades [1] [BRACHO C. 2005], pero menores estabilidades de la emulsión.

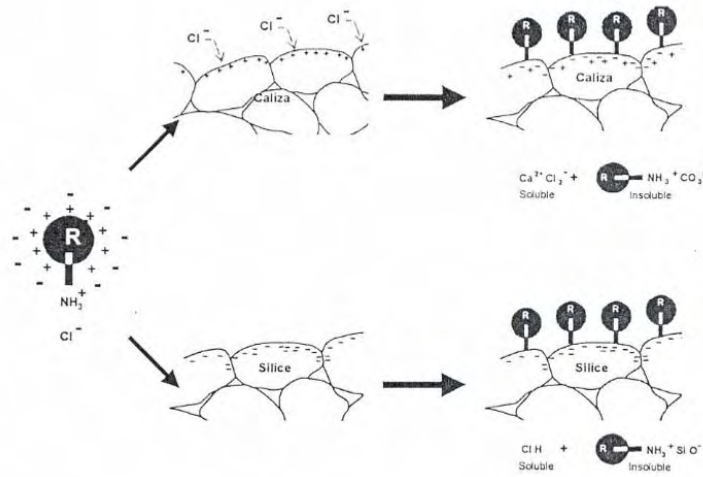


Figura IV.9 Adhesividad de una emulsión catiónica sobre diferentes agregados

Fuente: [12] [RODRIGUEZ MUÑOZ E. 2006]

La Tabla IV.3 incluye una clasificación de las emulsiones.

Tabla IV.3 Clasificación de emulsiones.

Tipos y porcentajes típicos de emulsificante

Tipo de Emulsión	Emulsificante (%)	pH	Tipo de emulsificante
Catiónica de rotura rápida	0,15 – 0,25	2,0 – 4,0	Grasa diamina
Catiónica de rotura media	0,30 – 0,60	1,5 – 4,0	Grasa diamina
Catiónica de rotura lenta	0,80 – 2,00	2,0 – 5,0	Amina cuaternaria
Aniónica de rotura rápida	0,20 – 0,40	10,5 – 12,0	Resina ácida
Aniónica de rotura media	0,40 – 0,80	10,5 – 12,0	Resina ácida
Aniónica de rotura media	1,20 – 2,50	7,50 – 12,0	Lignosulfonato no-iónico

Fuente: [8] [SOENGAS C. 2006]

También se las puede clasificar según la concentración de fases en dos tipos:

- Una emulsión *directa* es aquella en que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa;
- Una emulsión *inversa*, es aquella en que la fase acuosa esta dispersa en la parte hidrocarbonada.



Las del primer tipo son las que más se emplean en la industria caminera.

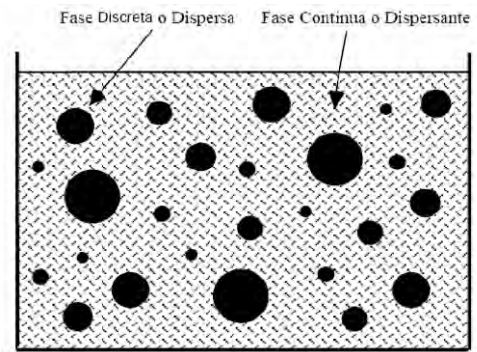


Figura IV.10 Fases de una emulsión asfáltica

Según [1] [BRACHO C. 2005] es preferible el empleo de las emulsiones directas por su baja viscosidad a temperatura ambiente, esto favorece el mojado, distribución y cohesión con el material.

IV.5 FABRICACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones se fabrican en instalaciones o plantas las cuales constan del equipamiento necesario para producir la dispersión del ligante asfáltico en el agua.

En el proceso de fabricación, el betún asfáltico es sometido a intensas tensiones de corte interno, mediante un molino coloidal (Figura IV.11), hasta conseguir que se establezca una dispersión de micro burbujas de asfalto en agua. Estas micro burbujas tienen una naturaleza hidrófoba (repulsión al agua) que genera fuerzas de atracción entre sí, tendiendo a que se choquen y unan dando lugar al fenómeno de coalescencia por el cual la emulsión rompe. Este fenómeno se evita mediante la utilización de agentes emulsificantes [8] [SOENGAS C. 2006].

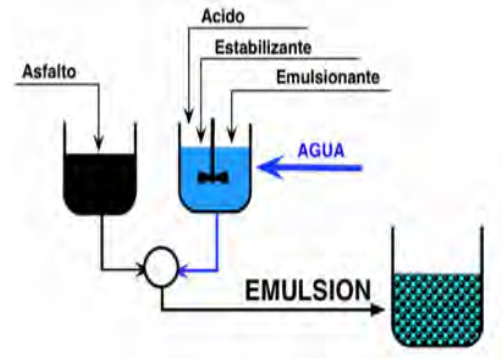


Figura IV.11 Molino coloidal

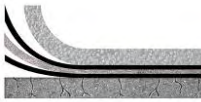
En la Figura IV.12 se reproduce las distintas instancias que posee el proceso de fabricación hasta la rotura de una emulsión asfáltica.



Figura IV.12 Etapas en la fabricación de una emulsión

Fuente: [6] [TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2006]

Durante la fabricación de la emulsión, los cationes son adsorbidos por los glóbulos asfálticos, la parte lipófila R' se vuelve hacia el interior y el radical NH_3^+ se sitúa en la interfase betún / agua. Los aniones CL^- permanecen en el agua y los glóbulos de betún están cargados positivamente por la acumulación de grupos NH_3^+ en la periferia.



Este hecho asegura, por un lado la estabilidad de la emulsión, por repulsión electrostática y por otro una buena afinidad del glóbulo de betún frente a las superficies minerales cargadas negativamente.

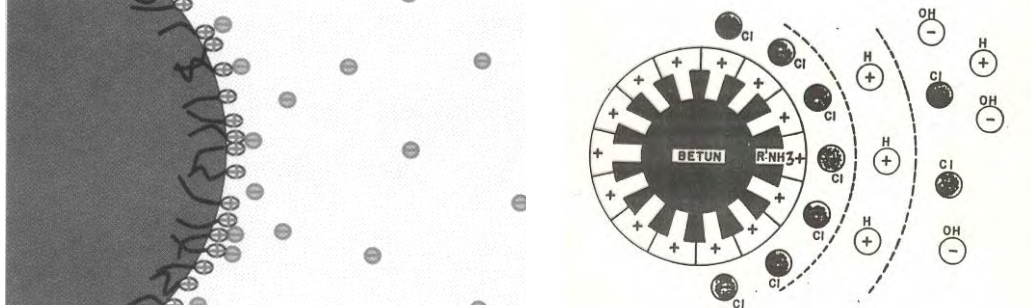


Figura IV.13 Las cargas positivas se concentran en la gota de asfalto y las cargas negativas quedan en la fase acuosa

Fuente: [6] [TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2006]

En cuanto al tamaño de las partículas de la emulsión, ésta es función del emulsificante, de la energía mecánica aplicada en el momento de la fabricación, de la naturaleza y cantidad de ligante y de las condiciones hidrodinámicas en las que se efectúa el proceso de emulsificación. De su dispersión dependen directa o indirectamente la estabilidad al almacenamiento, la viscosidad, reactividad y adhesividad, propiedades importantísimas de las emulsiones asfálticas.

A mayor concentración de emulsificante menor será el tamaño de las partículas.

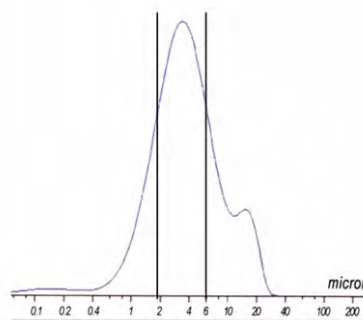


Figura IV.14 Distribución del tamaño de partícula, lograda en la mayoría de las emulsiones asfálticas

Fuente: [13] [AKZO NOBEL 2003]



El porcentaje de emulsificante que interviene en una emulsión asfáltica es raro que sea superior al 1%, en especial si las emulsiones son catiónicas, donde pueden ser tan bajos como 0,2% [14] [FRANCO R. 2002].

IV.6 EMULSIONES ASFÁLTICAS COMO RIEGO DE ADHERENCIA

La cantidad de ligante asfáltico residual sobre la superficie del pavimento es el factor más importante en la obtención de un vínculo adecuado entre la superficie del pavimento existente y el material geosintético. En consecuencia, la tasa de aplicación de una emulsión utilizada como riego debe basarse en la cantidad deseada del residuo asfáltico, estipulado por las especificaciones particulares de la obra, de acuerdo al tipo de material geosintético utilizado como sistema de prevención de la fisuración refleja. Esta diferenciación entre dotación de emulsión y de residuo asfáltico es muy importante tenerla presente, ya que muchos problemas han surgido en obra respecto a la mala ejecución del riego.

Los tipos de riego utilizados en obras viales son: [15] [PARAMO J. y CASSAN R. 1997]

- **Riego paliativo de polvo:** se aplica para disminuir la formación de polvo.
- **Riego de curado:** se aplica sobre suelos estabilizados con agentes hidráulicos (cal, cemento, etc.) con objeto de preservar la humedad necesaria para que se produzcan las reacciones físico-químicas propias de los estabilizantes.
- **Riego de imprimación:** tiene por objeto saturar de asfalto los poros, conductos capilares y oquedades, recubriendo en su totalidad las partículas sueltas o adheridas a la superficie, confiriéndole impermeabilización, estanqueidad y adherencia entre esta y la capa que se ejecute posteriormente.
- **Riego de liga:** tiene por objeto lograr buena ligazón o adherencia con la nueva capa asfáltica a construir. Para ello debe producir una capa de asfalto residual delgada y uniforme.



El riego debe aplicarse uniformemente sobre toda la superficie previamente acondicionada (limpia y firme), para brindar una correcta y uniforme cobertura de la superficie, Figura IV.15, Figura IV.16, Figura IV.17 y Figura IV.18 [2] [RICCI L. 2011].

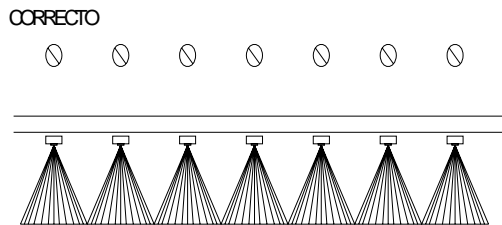


Figura IV.15 Correcta orientación de las boquillas dispersoras



Figura IV.16 Ejecución del riego en forma correcta

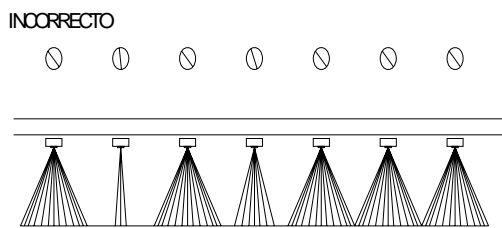


Figura IV.17 Mal orientación de las boquillas dispersoras



Figura IV.18 Ejecución del riego en forma incorrecta

Fuente: [2] [RICCI L. 2011]

El común problema de la adherencia entre capas es la circulación del tránsito de obra que se lleva en sus neumáticos parte del riego dejando expuesta la superficie, Figura IV.19. Cuando se coloca el material geosintético se crean pobres interacciones en esos sectores disminuyendo la adherencia y por ende provocando el desprendimiento del mismo llegando a formar arrugas con la consecuencia de no trabajar de acuerdo al objetivo con que fue planteado.

La emulsión termoadherente (ETRAD) es una de las emulsiones desarrolladas en este sentido, pero presenta el inconveniente de



necesitar de la aplicación de la mezcla asfáltica en caliente para posibilitar la adherencia entre capas, Figura IV.20.

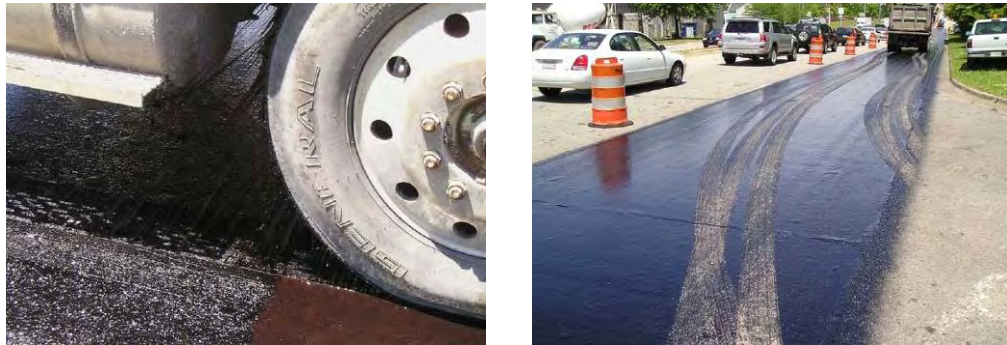


Figura IV.19 Riego arrastrado por equipos de obra



Figura IV.20 Riego termoadherente

IV.7 EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Se denominan así a las emulsiones asfálticas en las que el asfalto residual presenta características reológicas y mecánicas notablemente mejorables respecto al asfalto base, debido a la incorporación de sustancias macromoleculares (polímeros termoplásticos en general), en la fase acuosa previa a la emulsificación [16] [FONSECA M. A. 2002].

Las emulsiones modificadas se pueden clasificar en las denominadas monofásicas, que exigen la modificación previa del asfalto y se caracterizan por poseer una fase acuosa dispersa compuesta únicamente de pequeñas gotas de asfalto, previamente modificado, en una fase continua acuosa y las denominadas bifásicas, llamadas así porque en la



fase acuosa continua están dispersas partículas de asfalto y partículas de polímeros [17] [FERRE PEDRO 2007].

Una de las principales ventajas de las emulsiones modificadas con polímero es su aplicabilidad de impermeabilización, proporcionando una mejor resistencia a la cizalladura de interfaz, mejorando la distribución de las tensiones y el aumento de la resistencia a la deformación [18] [RABIOT D.; MORIZUR M. F. 1996].

IV.7.1 Normativa sobre emulsiones modificadas

En lo que se refiere a emulsiones modificadas, se recoge de la normativa europea [UNE-EN 13808:2005] [19] Especificaciones de las emulsiones bituminosas catiónicas y la normativa española en su Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) Orden Circular 322/1997 [20], con la denominación de Artículo 216 “Emulsiones bituminosas modificadas con polímeros”, sus aplicaciones.

La Tabla IV.4 incluye una clasificación de las emulsiones modificadas.

Tabla IV.4 Clasificación de emulsiones modificadas

Emulsión bituminosa	Carácter iónico	Rotura	Aplicación
ECR-1m	Catiónica	Rápida	Riego de adherencia
ECR-2m	Catiónica	Rápida	Riego de adherencia y tratamiento superficial
ECR-3m	Catiónica	Rápida	Tratamiento superficial
ECM-m	Catiónica	Media	Mezclas en frío
EAM-m	Aniónica	Media	Mezclas en frío
ECL-2m	Catiónica	Lenta	Micro aglomerados en frío

Fuente: [20] Orden Circular 322/1997



La Tabla IV.5 reúne las designaciones de las emulsiones modificadas y el campo de aplicación.

Tabla IV.5 Designación de empleo

Designación Ligante según O.C. 322/97	Tratamiento Sup. con Gravilla	Mezcla Drenante	Lechadas	Mezclas abiertas en frío	Riego de adherencia
ECL-2m			X		
ECM-m		X		X	
EAM-m		X		X	
ECR-1m					X
ECR-2m	X				X
ECR-3m	X				

Fuente: [\[20\] Orden Circular 322/1997](#)

La normativa europea diferencia las emulsiones modificadas de las convencionales en las características de elasticidad de su residuo, y en el método de ensayo empleado para su recuperación.

IV.7.2 Emulsiones consideradas en la investigación

Se consideran tres tipos de emulsiones, buscando aquella que permita brindar las mejores características y comportamiento al ser aplicadas entre capas y en contacto con el material geosintético.

IV.7.2.1 Emulsión termoadherente

Son emulsiones catiónicas de rotura rápida desarrolladas para evitar que se adhieran los neumáticos del tránsito de obra. Se caracterizan por presentar un residuo de destilación duro, lo que resulta más difícil la emulsificación. A temperatura ambiente no presenta adherencia. En estas emulsiones la mezcla asfáltica en caliente reblandece la superficie dura



del asfalto produciéndose de esta manera la adherencia. [21] [PAEZ DUEÑAS A., MIRO RECASENS R. 2003]

Las especificaciones según el fabricante se incluyen en la Tabla IV.6.

Tabla IV.6 Características de la emulsión termoadherente (ETRAD)

Ensayo	Unidad	Norma IRAM	Exigencia
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	SSF	6721	Max 50
Residuo asfáltico por destilación	g/100g	6719	Min 57
Asentamiento a 5 días	g/100g	6716	Max 5
Carga de partículas	-	6690	positiva
Residuo sobre tamiz IRAM 850 mm	g/100g	6717	Max 0,1
Ensayos sobre el residuo de destilación			
Penetración del residuo	0,1 mm	6576	15 < p < 50
Punto de ablandamiento	°C	6841	> 65

Nota: Estas no cuentan con normativa vigente en nuestro país.

El éxito de estas emulsiones se fundamenta en que tienen un ligante residual de baja pegajosidad a la temperatura de trabajo; ese ligante se vuelve pegajoso al contacto de la mezcla en caliente resultando la resistencia al despegue superior al que proporcionan las emulsiones convencionales [22] [POTTI J. 2005].

IV.7.2.2 Emulsiones de imprimación

Son emulsiones catiónicas convencionales que se aplican sobre una superficie sin tratar sobre la que se ejecuta algún tratamiento o carpeta. Estas emulsiones se encuentran normalizadas bajo [norma IRAM 6691](#) [23] clasificadas como Emulsiones Asfálticas Catiónicas para Imprimación (CI).

Operan entre la construcción de la base y la colocación de la carpeta asfáltica. En este periodo se requiere proteger la base de la lluvia y del tránsito. El riego de imprimación endurece la superficie, aglomera las



partículas sueltas, obtura los vacíos capilares superficiales, impermeabiliza las superficies y por otro lado genera una interfase para que el riego de liga sea colocado sobre una superficie a fin. [24] [PETROQUIMICA S. A.].

Una vez aplicado el riego de imprimación este trabaja proveyendo adherencia entre la base y la siguiente capa asfáltica.

Las especificaciones según el fabricante se incluyen en la Tabla IV.7.

Tabla IV.7 Características de la emulsión de imprimación (EAI)

Ensayo	Unidad	Norma IRAM	Exigencia
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	SSF	6721	-
Residuo asfáltico por destilación	g/100g	6719	Min 55
Hidrocarburos destilables	ml/100ml	6719	Max 15
Contenido de agua	g/100g	6719	Min 35
Asentamiento 5 días	g/100g	6716	Max 15
Residuo sobre tamiz IRAM 850 mm	g/100g	6717	Max 0,1
Ensayos sobre el residuo de destilación			
Penetración del residuo	0,1 mm	6576	100 < p < 300
Ductilidad	cm	6579	Min 40
Oliensis	-	6594	Negativo

IV.7.2.3 Emulsiones modificadas con polímero

Son emulsiones modificadas generalmente con elastómeros del tipo:

- Látex de cauchos naturales o sintéticos (tipo SBR o Neopreno)
- Copolímero de etileno-acetato de vinilo (EVA)
- Polímeros elastoméricos (SBS)

Al utilizar una emulsión asfáltica modificada con polímero se tiene un residuo con propiedades físicas superiores con un mejor desempeño [10] [ACHA H. y HERNANDEZ J. 2005]. Las especificaciones según el fabricante se incluyen en la Tabla IV.8.

**Tabla IV.8 Características de la emulsión modificada (ECRR-M)**

Ensayo	Unidad	Norma IRAM	Exigencia
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	SSF	6721	Min 30
Residuo asfáltico por destilación	g/100g	6719	Min 63
Hidrocarburos destilables	ml/100ml	6719	Max 15
Asentamiento 5 días	g/100g	6716	Max 5
Residuo sobre tamiz IRAM 850 mm	g/100g	6717	Max 0,1
Ensayos sobre el residuo de destilación			
Penetración del residuo	0,1 mm	6576	40 < p < 60
Oliensis	-	6594	Negativo

La [norma IRAM 6698 Asfaltos \[25\]](#); Emulsiones asfálticas catiónicas modificadas, en su Tabla B.1 “Diferentes usos de las emulsiones catiónicas modificadas en construcciones viales”, presenta una recomendación de tipo de emulsión a emplear según el uso que se le dará en obra, Tabla IV.9.

IV.7.3 Emulsión seleccionada para la investigación

IV.7.3.1 Aspectos considerados para su selección

La elección de la emulsión, para una aplicación en particular, es una cuestión de adecuación de la reactividad de la emulsión con la reactividad de los materiales con los que entra en contacto y las condiciones ambientales. [\[6\] \[TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 2006\]](#)

Un riego de adherencia, es una tarea que se ejecuta en un estadio previo a la colocación del material geosintético y/o la carpeta de rodamiento. Es allí que las emulsiones de rotura rápida, cobran verdadera importancia, minimizando los tiempos existentes entre la construcción o reparación de la base y la nueva construcción de la carpeta de rodamiento. Algunas publicaciones norte americanas, como el “Tack Coat Guidelines” publicado por el Departamento de Transporte de California en el año 2009, aseguran también que las emulsiones catiónicas son menos sensibles al contacto con la humedad y a la temperatura.



La elección de una emulsión catiónica modificada se ve así justificada por lo expuesto anteriormente y dado que posee mayor afinidad con gran parte de los áridos presentes en los paquetes estructurales de pavimentos que se emplean en nuestra región, brindando importantes ventajas sobre las convencionales.

Sobre las emulsiones seleccionadas se realiza una serie de ensayos de caracterización y comportamiento sobre el sustrato de hormigón (mojado, tiempo de corte, penetración en los capilares y propagación, espesor de residuo depositado), características que se presentan en el Punto IV.8; se decide emplear para la investigación una emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida modificada con polímero elastomérico SBS, Figura IV.21 y Figura IV.22, de reconocida eficiencia y provista por un fabricante de la órbita Nacional lo cual la hace accesible a las distintas reparticiones, empresas o entes encargados de ejecutar mantenimiento en caminos de nuestro país.



Figura IV.21 Elastómero SBS

El grupo estireno-butadieno le proporciona al asfalto un aumento de su rigidez, en la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas y un aumento en las propiedades de adherencia que favorece las mezclas utilizadas en pavimentos. El SBS se añade usualmente en el rango de 3-9% p/p de la mezcla [26] [SOENEN et al., 2006].

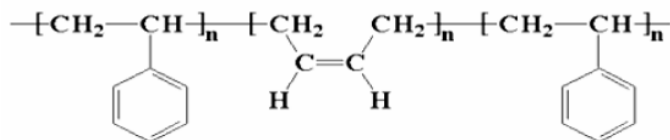


Figura IV.22 Estructura física molecular del SBS

Fuente: [27] [MÚNERA OSSA J. C. 2012]

IV.7.3.2 Caracterización de la emulsión empleada

Obtenida la emulsión asfáltica a emplear en los trabajos de investigación en cantidades y condiciones adecuadas, se caracteriza mediante los ensayos de laboratorio fijados por la [norma IRAM 6698 Asfaltos \[25\]](#); Emulsiones asfálticas catiónicas modificadas. Dichos ensayos y los requisitos mínimos a cumplir quedan expresados en la Tabla IV.9 “Emulsiones catiónicas modificadas: ensayos sobre la emulsión original”, de la norma mencionada.

La Tabla IV.10 muestra los resultados de los ensayos sobre el residuo de evaporación (obtenido de acuerdo a la norma IRAM 6694) de las emulsiones catiónicas modificadas.



Tabla IV.9 Emulsiones catiónicas modificadas: ensayos sobre la emulsión original

Características		Unidad	Requisitos														Método de ensayo
			Rotura rápida						Rotura media		Rotura lenta		Superestable		Rotura controlada		
			CRR 0m		CRR 1m		CRR 2m		CRMm		CRLm		CRSm		CRCm		
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Viscosidad Saybolt–Furol a	25 °C	s	–	50	20	–	–	–	–	–	–	–	–	50	–	50	IRAM 6721
	50 °C		–	–	–	–	40	–	20(*)	–	–	–	–	–	–	–	
Residuo asfáltico		g/100 g	57	–	63	–	67	–	60	–	60	–	60	–	60	–	IRAM 6719
Hidrocarburos destilables		ml/100 ml	–	3	–	3	–	3	–	12	–	–	–	–	–	–	IRAM 6719
Contenido de agua		g/100 g	–	43	–	37	–	33	–	40	–	40	–	40	–	40	IRAM 6719
Asentamiento		g/100 g	–	5	–	5	–	5	–	10	–	5	–	5	–	5	IRAM 6716
Residuo sobre tamiz IRAM 850 µm		g/100 g	–	0,1	–	0,1	–	0,1	–	0,1	–	0,1	–	0,1	–	0,1	IRAM 6717
Superficie recubierta y resistencia al agua		–	80	–	80	–	80	–	30	–	–	–	–	–	–	–	IRAM 6679
Mezcla con cemento		g/100 g	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2(**)	–	2(**)	–	2(**)	IRAM 6718



Tabla IV.9 Continua - Emulsiones catiónicas modificadas: ensayos sobre la emulsión original

Mezcla con arena silíceo y agua	-	-	-	-	Debe cumplir con el corte según el tipo (***)	Debe cumplir con el corte según el tipo (***)	-	[1]	5.3
Mezcla de lechada con arena granítica	-	-	-	-	-	-	Debe cumplir el ensayo	-	5.4
Carga de partículas	Positiva								IRAM 6690

(*) Para las emulsiones de rotura media sin solvente, la viscosidad Saybolt Furol se debe medir a 25°C exigiéndose un mínimo de 20.

(**) Las emulsiones modificadas CRLm, CRCm y CRSm que no cumplan la especificación de mezcla con cemento, podrán aceptarse previa comprobación de su aptitud para el uso que se destinen.

(***) Para la emulsión de rotura media con solvente no se exige este requisito.

(1) No se le exige un tipo de corte en particular.



Tabla IV.10 Emulsiones catiónicas modificadas: ensayos sobre la residuo de evaporación (obtenido de acuerdo a la norma IRAM 6694)

Características	Unidad	Requisitos														Método de ensayo
		Rotura rápida						Rotura media		Rotura lenta		Superestable		Rotura controlada		
		CRR 0m		CRR 1m		CRR 2m		CRMm		CRLm		CRSm		CRCm		
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Penetración (*)	0,1 mm	50	200	50	200	50	200	50	200	50	200	50	200	50	200	IRAM 6576
Punto de ablandamiento	°C	50		50		50		40		50		50		50		IRAM 6841
		40		40		40			45		45		40			
Ductilidad a 5°C	cm	10		10		10		10		10		10		10		IRAM 6579
Recuperación elástica por torsión	%	12		12		12		12		12		12		12		IRAM 6830
Solubilidad en 1,1,1-tricloroetano	g/100 g	95		95		95		95		95		95		95		IRAM 6585
Punto de rotura fraass	°C		-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10	IRAM 6831
Ensayo Oliensis	-	Negativo														IRAM 6594

(*) Las emulsiones modificadas con menor penetración en el residuo luego del ensayo de evaporación, se las designa añadiéndole la letra "d". Otros valores de penetración en el residuo de las emulsiones pueden fijarse en cada caso por las condiciones particulares de la obra.



En la Tabla IV.11 y Tabla IV.12, se indican los resultados de ensayos realizados sobre la emulsión empleada (ECRR-M) en los trabajos de investigación, siguiendo la normativa IRAM.

Tabla IV.11 Resultados obtenidos de la emulsión empleada

Características	Unidad	Determinación
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	s	33,7
Residuo asfáltico por destilación	g/100g	65,3
Residuo asfáltico por evaporación	g/100g	67,6
Hidrocarburos destilables	ml/100ml	0,5
Contenido de agua	g/100g	37,5
Asentamiento	g/100g	1,7
Resíduo sobre tamiz IRAM 850 µm	g/100g	0,06
Carga de partículas (*)	-	Positiva

(*) valor dado por el fabricante

Tabla IV.12 Resultados obtenidos del residuo recuperado de la emulsión empleada

Características	Unidad	Determinación
Penetración del residuo	0,1 mm	90
Ductilidad	cm	> 100
Solubilidad en 1,1,1 – tricloroetano	g/100 g	-
Ensayo de Oliensis	-	negativo
Recuperación elástica por torsión	%	-
Punto de rotura fraass (**)	°C	-

Se analiza la emulsión seleccionada (ECRR-M), mediante el microscopio de fluorescencia Olympus BX-51 UP03, al cual se le adaptó una cámara Olympus QColor 3. Las imágenes se toman con una magnificación de 20X, obteniéndose un tamaño de partícula entre 0,18 y 9 µm.

En el Microscopio óptico de fluorescencia, la radiación emitida por la lámpara es filtrada en un estrecho intervalo de longitudes de onda. El haz de luz llega a la muestra a través del objetivo por el que se observa simultáneamente la luz emitida por la muestra a longitudes de onda distintas de la de irradiación. Este fenómeno permite observar la micro

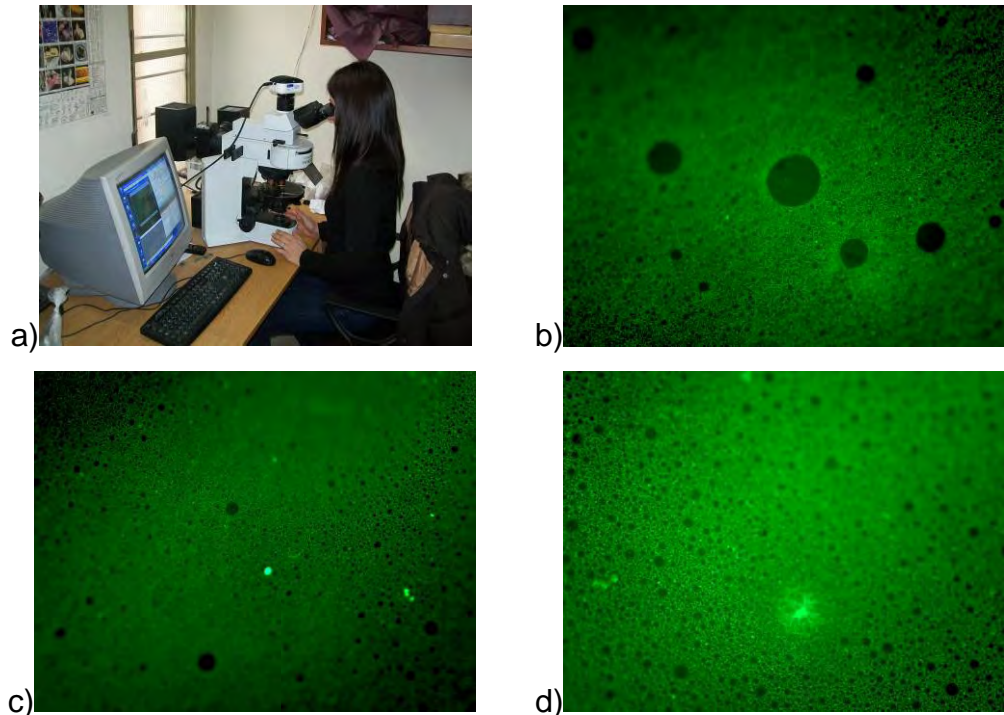


Figura IV.23 Distribución de partículas

La microscopia de fluorescencia revela, después de 24 hs de secado de la emulsión, la aparición de partículas poliméricas como la parte brillante, mientras que la más oscura corresponde a la fase de asfáltenos y maltenos, los que a su vez contienen los aromáticos.

La [norma UNE-EN 13632:2004 \[28\]](#) “Betunes y ligantes bituminosos. Visualización de la dispersión de polímero en betunes modificados con polímeros”, determina el método adecuado para la toma de muestra, determina que el objetivo utilizado debe ser de un aumento entre 20X y 50X, y determina la clasificación de la muestra según el patrón presentado en la Figura IV.24.

Este patrón clasifica a la muestra en una escala de 0 a 10, donde para 0 representa una muestra completamente negra, sin presencia de polímero. El problema que se presenta en esta norma es que no cuantifica las



Tesis doctoral de Héctor Luis Delbono. Capítulo IV
muestras, solo las pone en una escala sin determinar si la dispersión es buena o mala.

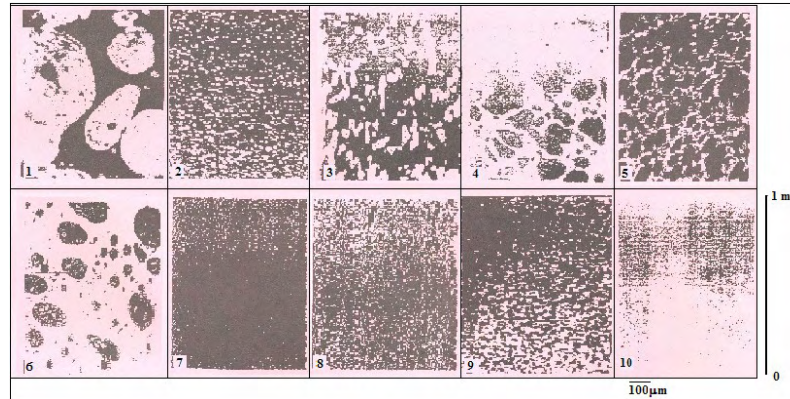


Figura IV.24 Patrón de muestras de asfalto modificado según norma UNE-EN 13632:2004

Germán Garzón (2004) presentó en una conferencia brindada en Costa Rica, un patrón de la compatibilidad del asfalto modificado con el polímero, dando una respuesta a las observaciones obtenidas. La Figura IV.25 presenta el patrón obtenido. De acuerdo al patrón brindado por Garzón, podemos decir que la dispersión del polímero SBS resulta entre Media y Muy Buena.

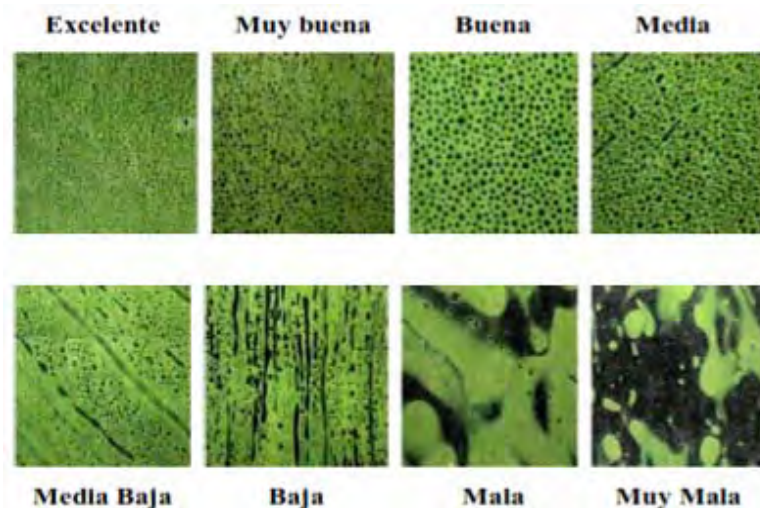


Figura IV.25 Asfalto modificado con polímero, patrón

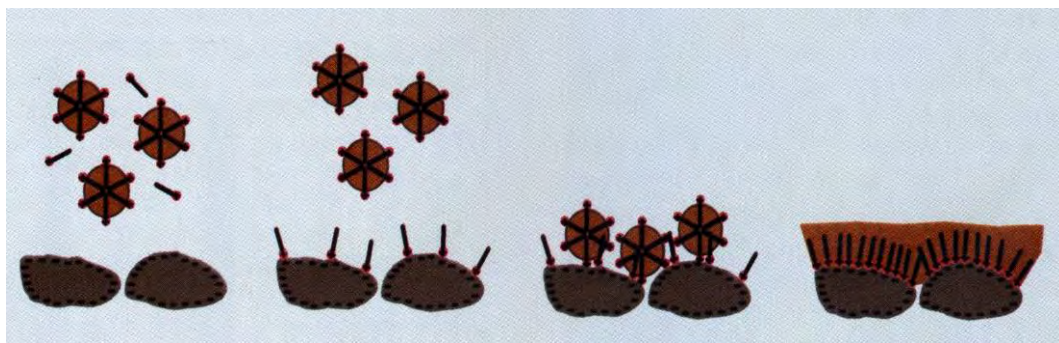
Fuente: [29] [AVELLÁN CRUZ, MARTHA DINA 2007]



IV.8 COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN SOBRE EL HORMIGÓN

IV.8.1 Proceso de rotura

La rotura de una emulsión es un proceso complejo donde intervienen distintos factores; para que se produzca la separación de fases y se forme la película de cemento asfáltico sobre el sustrato, debe producirse la evaporación de agua y la reacción físico-química entre el emulsificante y la superficie del agregado [8] [SOENGAS C. 2006].



Contacto de la emulsión con el agregado

Adsorción de emulsificantes libres

Electroforesis de partículas sobre la superficie

Coagulación y formación de película

Figura IV.26 Proceso de rotura de la emulsión

El aumento de la concentración de emulsionante disminuye la reactividad de la emulsión. La cantidad del emulsionante libre es un factor muy importante en el proceso de rotura, variando su velocidad, en función de su interacción con los materiales y factores ambientales [8] [SOENGAS C. 2006].

La forma de rompimiento de las emulsiones catiónicas, en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla dentro de la masa del agregado pétreo; permitiendo además, continuar con los trabajos de asfaltado en regiones con climas húmedos o



Tesis doctoral de Héctor Luis Delbono. Capítulo IV durante temporadas de lluvias, garantizando la apertura de los caminos en corto periodo de tiempo [11] [RODRIGUEZ TALAVERA et al., 2001].

Buscando analizar el comportamiento de la emulsión sobre el sustrato de hormigón, se realizaron algunos ensayos específicos.

IV.8.2 Tensión superficial

Se determina la tensión superficial de la emulsión con el fin de analizar el comportamiento de la emulsión sobre el sustrato de hormigón.

Por definición ISO (International Organization for Standardization) se conoce tensión superficial como la tensión que actúa en la superficie de una fase, dirigida hacia el interior de la fase, causada por las atracciones intermoleculares entre las moléculas situadas en la superficie y aquellas situadas debajo de la superficie [4] [FERRE FRANQUET P. 2005].

Para un sistema sólido-líquido, como es nuestro caso, resulta una buena aproximación expresar la tensión interfasial presente durante el proceso de humectación como la diferencia entre las tensiones involucradas inicialmente (principio de neutralización de Young), es decir:

$$\gamma_{SL} = \gamma_S - \gamma_L \quad \text{si } \gamma_S > \gamma_L \quad \text{ó} \quad \gamma_{LS} = \gamma_L - \gamma_S \quad \text{si } \gamma_L > \gamma_S$$

donde γ_{SL} es la tensión en la interfase mientras que γ_S y γ_L son las tensiones superficiales del sólido y del líquido respectivamente. Este postulado adquiere exactitud a medida que el ángulo de contacto entre ambas fases se aproxima a su mínimo valor ($\theta = 0^\circ$), o por el contrario, cuando toma los valores máximos ($\theta = 180^\circ$).

Se puede distinguir entre superficies con baja energía superficial (menor a 30 d/cm) o apolares y superficies con alta energía (entre 60 y 300 d/cm) o polares [30] [GALLEGO MIRALLES, SERGIO 2004].



IV.8.2.1 Tensión superficial de líquidos

Se determina la tensión superficial de la emulsión mediante dos métodos:

- **Método del peso de la gota**

Este procedimiento comprende la formación gradual de una gota en el extremo inferior de un tubo de radio r ; de esta manera, la gota aumenta su tamaño hasta que la tensión superficial del líquido que la origina no puede resistir su peso y en consecuencia se desprende del tubo, Figura IV.27.

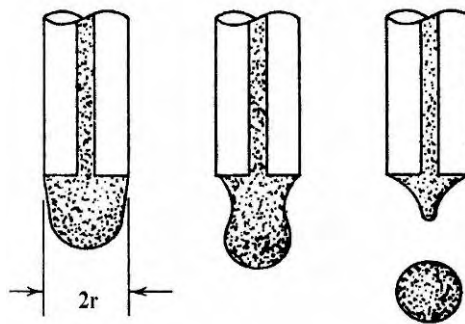


Figura IV.27 Método del peso de la gota

Empleando este método se realizaron ensayos de tensión superficial utilizando el goniómetro Ramé-Hart Modelo 500, realizándose 5 determinaciones de cada muestra a temperatura de 25 °C. Este ensayo fue realizado en el INIFTA (Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas), Figura IV.28.



Figura IV.28 Goniómetro



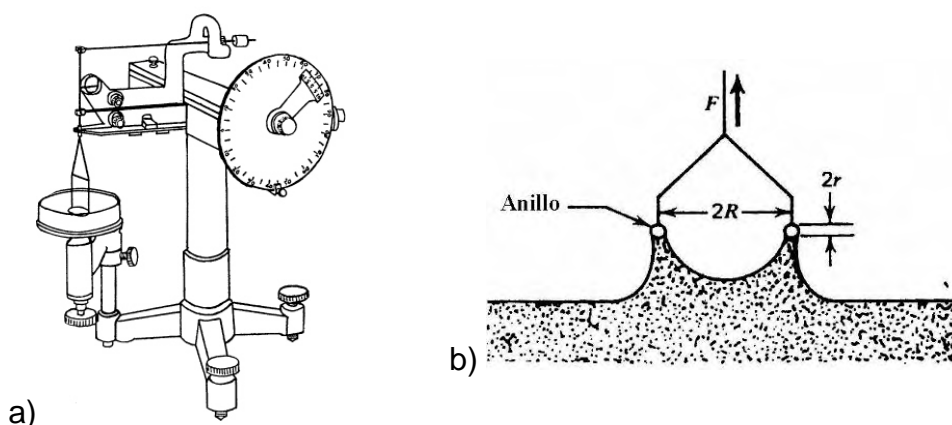
La Tabla IV.13 presenta los resultados obtenidos.

Tabla IV.13 Tensión superficial de las emulsiones

Emulsión a 25°C	Tensión Sup (dina/cm)
ETRAD	36,9
EAI	30,9
ECRR-M	37,0

- **Método del desprendimiento del anillo**

El tensiómetro de Du Nouy permite medir de manera sencilla la fuerza necesaria para extender una película líquida, Figura IV.29 y Figura IV.30. Para tal fin, el dispositivo posee un anillo horizontal de alambre de platino de radio R , fijo a un brazo de la balanza que se sumerge en el líquido (emulsión). Por medio de un alambre de torsión se aplica una fuerza a otro brazo de la balanza hasta que el anillo se separa de la superficie del líquido. Por consiguiente, la fuerza necesaria para producir el desprendimiento es $F = 2 (2\pi R \gamma)$, ya que el contacto entre el líquido y el anillo debe romperse en la circunferencia interior y exterior del mismo.



**Figura IV.29 Método del desprendimiento del anillo
Tensiómetro de Du Nouy**



Bajo este método se realizaron los ensayos de tensión superficial, a diferente temperatura, sobre las emulsiones seleccionadas para la investigación utilizando el equipo Du Nouy, disponible en el CIDEPINT, Figura IV.30.

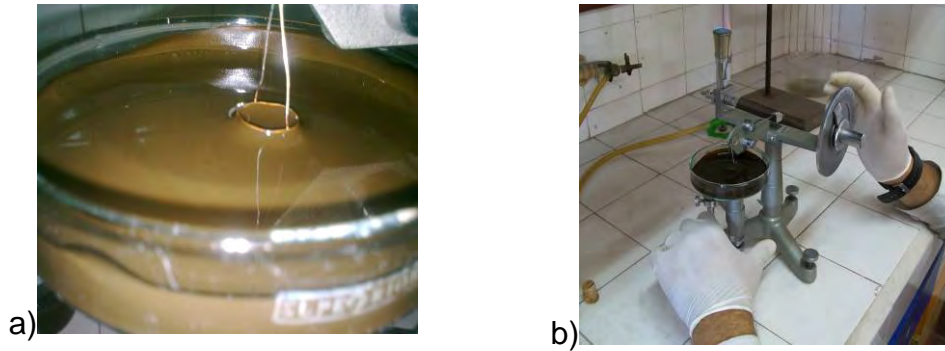


Figura IV.30 Ensayo de tensión superficial

En la Tabla IV.14 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla IV.14 Tensión superficial mediante el método Du Nouy (dina/cm)

Emulsión	Rango de temperatura (°C)			
	10	15	25	30
ETRAD	39,1	36,1	35,2	31,7
EAI	39,3	39,2	37,9	33,7
ECRR-M	38,1	37,0	36,4	35,2

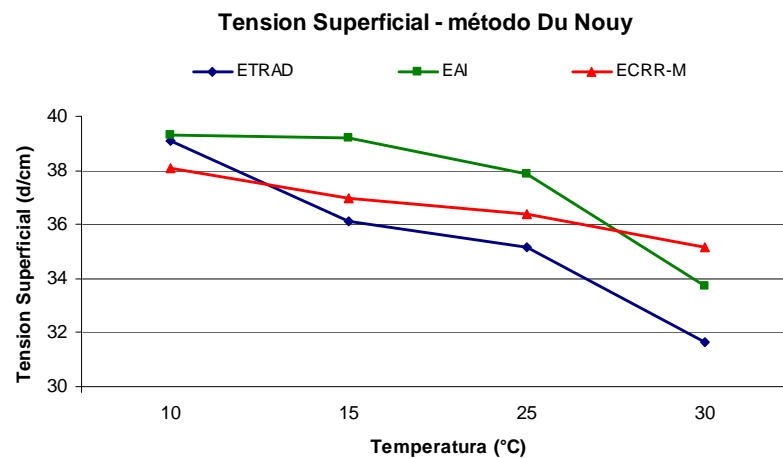


Figura IV.31 Tensión superficial versus temperatura



Las tensiones superficiales de las emulsiones oscilan entre 30 y 40 dina/cm, disminuyendo con el incremento de la temperatura.

La tensión superficial de la emulsión ECRR-M resulta estable con el incremento de la temperatura a diferencia de las demás emulsiones.

IV.8.2.2 Tensión superficial de sólidos

La determinación de la tensión superficial de sólidos es dificultosa; sin embargo, resulta posible obtener una relación entre la tensión interfasial que presenta la gota de emulsión sobre la superficie del hormigón y el ángulo de contacto entre ambas fases. De este modo y para la hipótesis $\gamma_L > \gamma_S$, utilizando el principio de neutralización de Young y la ecuación de equilibrio deducida del diagrama vectorial, Figura IV.34, aplicado en la interfase sólido-líquido en la que $\gamma_S = \gamma_{LS} + \gamma_L \cos \theta$, se obtiene una aproximación al valor de la tensión superficial del sólido a través de la siguiente expresión: $\gamma_S \approx \gamma_L (1 + \cos \theta) / 2$.

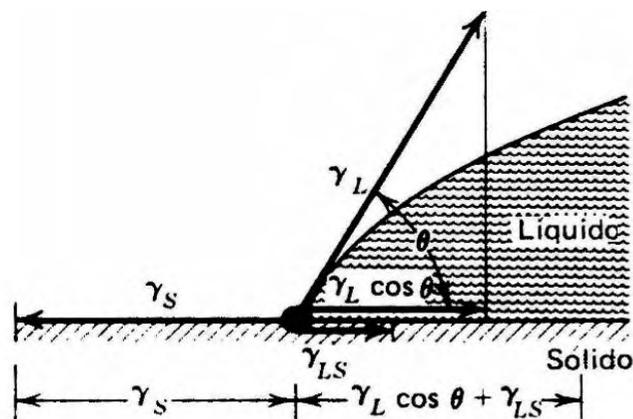


Figura IV.34 Diagrama vectorial en la interfase sólido-líquido

Para que la emulsión presente un buen desempeño en estado líquido, debe tener una tensión superficial menor que la base de hormigón, en ese caso se logra una buena humectación.



Tesis doctoral de Héctor Luis Delbono. Capítulo IV
Tabla IV.15 Tensión superficial

Ángulo de contacto	Grado de mojado	Fuerza	
		Sólido / Líquido interacciones	Líquido / Líquido interacciones
$\theta = 0$	Humectante perfecto	fuerte	débil
$0 < \theta < 90^\circ$	alta humectabilidad	fuerte	fuerte
		débil	débil
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	humectabilidad de baja	débil	fuerte
$\theta = 180^\circ$	perfectamente	débil	fuerte
	no humectante		

Fuente: [31] [EUSTATHOPOULOS N. et al., 1999]

Para medir estas propiedades se ha determinado separadamente la tensión superficial de la emulsión por los métodos citados, y la energía superficial del hormigón a través del ángulo de contacto de una gota depositada sobre el hormigón empleando un goniómetro.

Los goniómetros permiten esta medición procesando una imagen digital de una gota mediante el proceso de un algoritmo de segmentación de imagen, Figura IV.35.

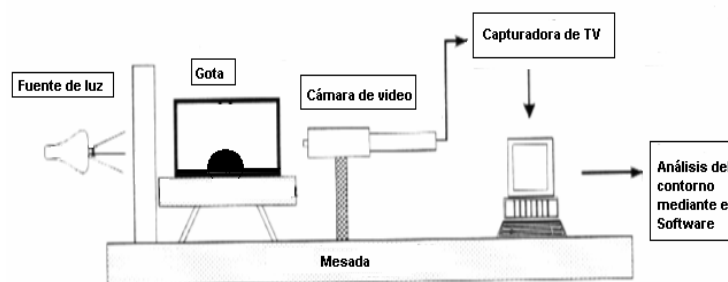


Figura IV.35 Esquema de obtención de la imagen

Se realiza el ensayo de ángulo de contacto a través del goniómetro Ramé-Hart Modelo 500 disponible en el INIFTA, utilizando una emulsión asfáltica modificada (ECRR-M), depositando la gota sobre una base de hormigón, acondicionada previamente a 25 °C, Figura IV.36.

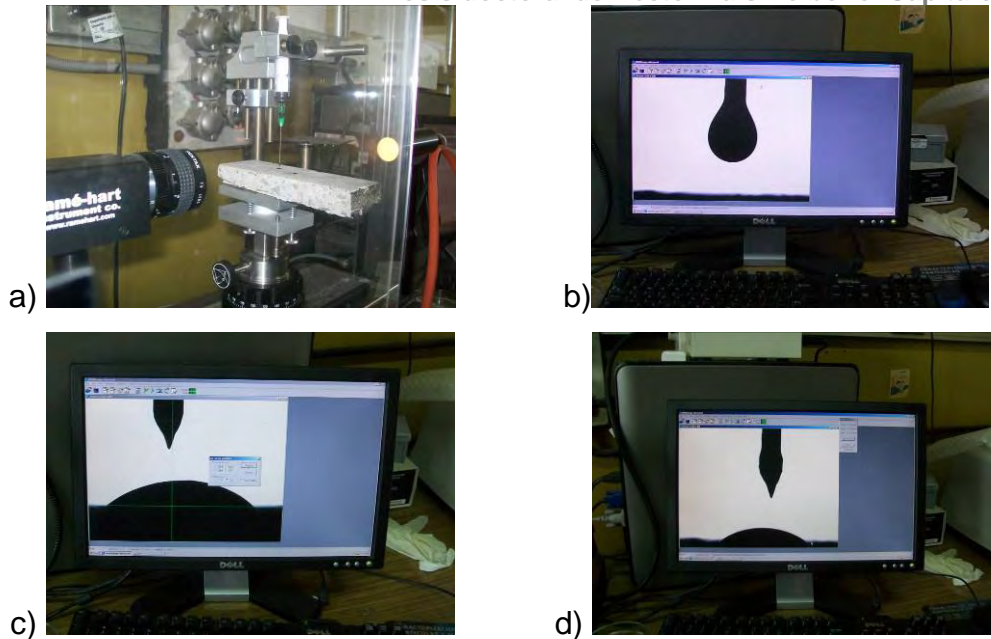


Figura IV.36 Determinación de ángulo de contacto sobre el sustrato de hormigón

Los resultados obtenidos del ensayo se presentan en la Tabla IV.16.

Tabla IV.16 Determinación de ángulo de contacto. Tabla resumen

Emulsión	Derecha Theta(R)	Izquierda Theta(L)	Media	Desv.	Altura	Ancho	Área	Volumen
ETRAD	40,37	44,38	42,38	2,01	0,930	5,157	23,12	9,47
EAI	36,99	37,06	37,02	0,54	0,828	5,189	22,87	8,67
ECRR-M	37,98	38,68	38,33	0,35	0,823	5,189	22,85	8,60

Nota: Los resultados son el promedio de tres determinaciones efectuadas, tomando una totalidad de 700 puntos en 350 segundos, tiempo límite fijado para la determinación.

Se concluye con el ensayo que las emulsiones mojan bien al hormigón quedando adherida a la superficie sólida, a través de la rotura (evaporación del agua), formando una película de pequeño espesor, lo que revela la existencia de fuerzas intermoleculares, de fuerte carácter atractivo.



IV.8.3 Humectancia

La humectancia es la capacidad que tiene el hormigón de ser mojado por la emulsión. También se denomina humectabilidad o mojabilidad. Así se enfrenta una energía superficial del sólido (hormigón) que tira hacia su superficie y una tensión superficial del líquido (emulsión) que tiende a mantener la gota redonda. Para una humectación efectiva de la superficie, la emulsión debe cubrir cada saliente y cada entrante de la superficie para desplazar todo el aire.

Durante la incorporación de la emulsión sobre el hormigón, se observan tres etapas perfectamente diferenciadas:

IV.8.3.1 Adhesión

La primera etapa se define como adhesión e involucra el contacto de las partículas del hormigón, de una determinada rugosidad superficial, con la emulsión.

Una vez que el contacto entre los dos materiales se ha producido la emulsión debe extenderse para humectar un área irregular del hormigón ligeramente superior debido a su rugosidad.

La adhesión para el sistema $\gamma_S < \gamma_L$, ocurre para ángulos menores que 90° (superficies lisas y rugosas). Por otro lado, si el ángulo de contacto es mayor que 90° , para superficies lisas la adhesión tiene lugar espontáneamente mientras que si es rugosa puede no ocurrir; en consecuencia, el aumento de la rugosidad en este caso convierte a la adhesión en un hecho menos probable.

Este fenómeno se encuentra garantizado ya que se entrega energía externa (colocación del refuerzo) promoviendo la adhesión.



IV.8.3.2 Penetración

La etapa siguiente al proceso de humectación se llama penetración; en ella, la emulsión ingresa por capilaridad al interior de los poros capilares del hormigón. En un principio ésta sólo tiene lugar en la superficie externa (sustrato de hormigón parcialmente humectado) debido a que el aire ocluido en los intersticios retarda el acceso de la emulsión y por lo tanto la humectación interna.

Existe una normativa que pone de manifiesto la capacidad de penetración de diferentes emulsiones y valora además el poder de penetración en un tiempo definido, la [norma UNE-EN 12849 \[32\]](#).

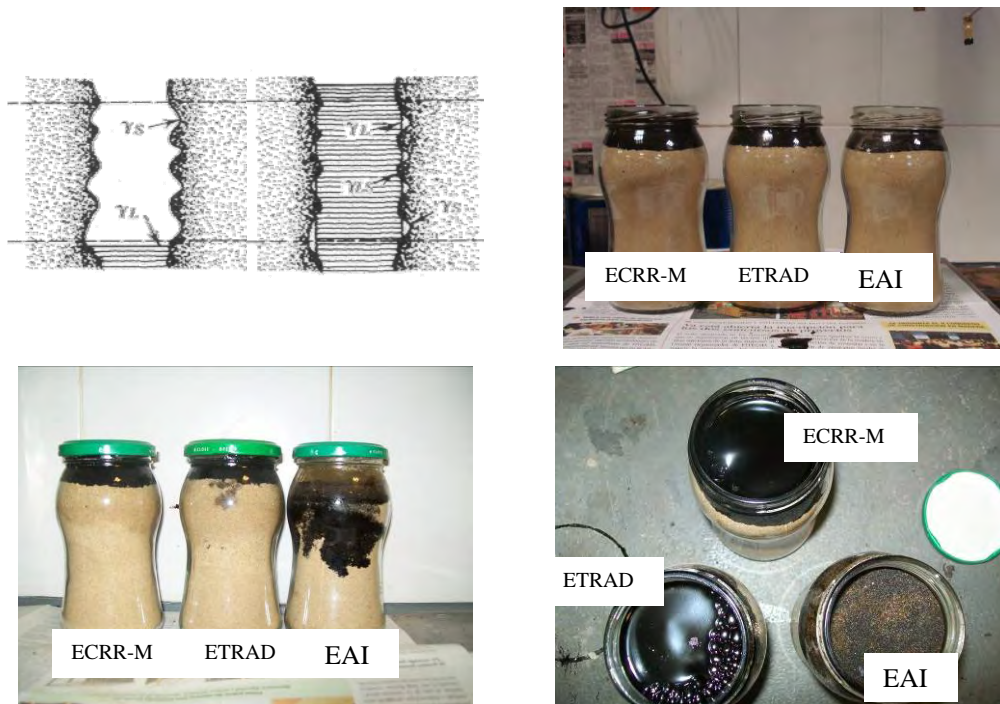


Figura IV.37 Penetración, medición después de 5 días

Complementariamente se realiza en ensayo de viscosidad Saybolt Furol, Figura IV.38, según [norma IRAM 6721 \[33\]](#), sobre las emulsiones a diferente temperatura.

La Tabla IV.17 muestra los resultados obtenidos.



Figura IV.38 Equipamiento para determinar la viscosidad Saybolt Furol

Tabla IV.17 Viscosidad Saybolt Furol sobre emulsiones asfálticas

Emulsión	Temperatura	Temperatura	Temperatura	Exigencia según cartilla técnica (25°C)
	(°C)	(°C)	(°C)	
	15	25	30	
ETRAD	24,6	32,2	38,3	≥30
EAI	27,1	34,6	39,0	≤50
ECRR-M	25,8	33,7	36,2	≥30

Viscosidad vs Temperatura

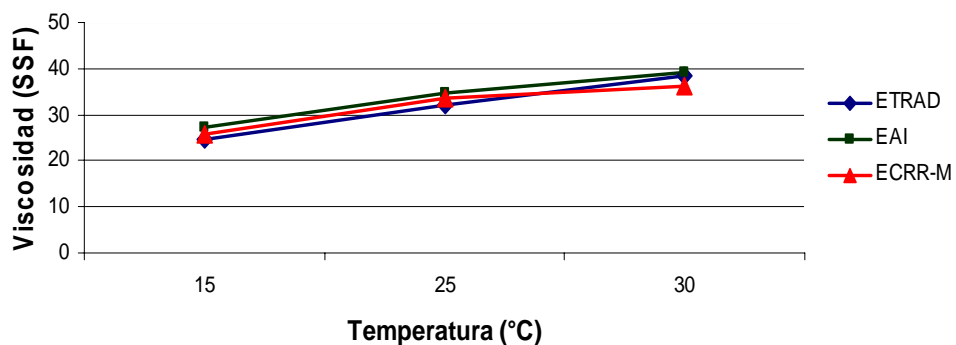


Figura IV.39 Viscosidad en función de la temperatura

La viscosidad aumenta con el incremento de la temperatura. Esta viscosidad permite penetrar y llenar los vacíos que presenta el hormigón, permitiendo formar una película continua donde descansa el material geosintético.



Se concluye que para lograr un resultado efectivo el requisito fundamental es asegurar un ángulo de contacto bajo con valores moderados de la tensión superficial del líquido.

IV.8.3.3 Propagación

Finalmente, tiene lugar la propagación o extensión en el proceso de humectación; en esta etapa la emulsión fluye sobre la superficie formando una película de reducido espesor, Figura IV.40. En este proceso se observan dos interfases perfectamente diferenciadas: líquido-sólido rugoso parcialmente humectado y líquido-aire.

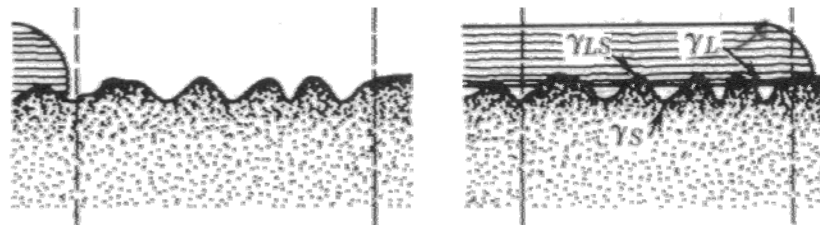


Figura IV.40 Propagación de la emulsión sobre el hormigón

Para ángulos menores que 90° la propagación se encuentra favorecida para altas rugosidades del hormigón. Para ángulos mayores que 90° domina el trabajo de contracción; no hay propagación.

IV.9 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

IV.9.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier

Se analizan las diferentes emulsiones mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Figura IV.42. Esta técnica, de análisis superficial, aporta información de la superficie sobre la que se está haciendo el análisis, donde el espectro resultante representa la absorción y la transmisión molecular de la muestra, creando una huella digital molecular.



El tamaño de los picos en el espectro es una indicación directa de la cantidad presente del material, los cuales son asociados a características funcionales o estructurales de la emulsión, estudiándose en infrarrojo medio ($4000-400\text{ cm}^{-1}$) [34] [LAMONTAGNE et al., 2001].



Figura IV.41 Equipo utilizado para la obtención de los espectros sobre las emulsiones asfálticas

Los espectros obtenidos para las diferentes emulsiones se asemejan bastante en su composición. Existe una banda entre los 3550 cm^{-1} y 3150 cm^{-1} correspondiente al estiramiento C-H de los grupos aromáticos. A las vibraciones 2930 cm^{-1} y 2850 cm^{-1} se hace presente el enlace C-H.

Entre los 1730 cm^{-1} y los 1550 cm^{-1} la emulsión ETRAD presenta una banda que corresponde al enlace C=O correspondiente al estiramiento del grupo carboxílico. A los 1450 cm^{-1} se presenta un pico marcado correspondiente al doble enlace C-C.

En lo concerniente a bajas vibraciones (conocida como área de impresión digital), a los 950 cm^{-1} se hace presente el enlace C-H y el doble enlace de los hidrocarburos saturados y los aromáticos.

Para el análisis, los espectros fueron comparados utilizando el libro Infrared Spectroscopy, edición 1969 [35].

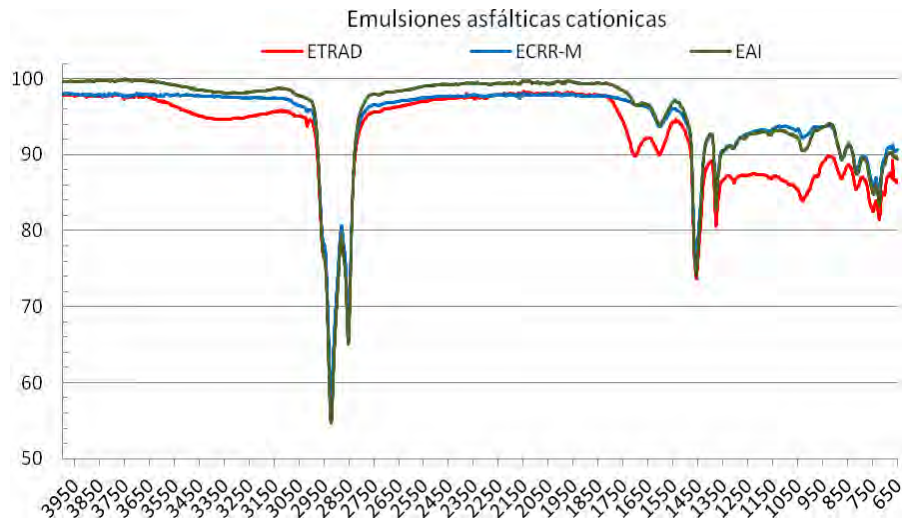


Figura IV.42 Espectros de las emulsiones

IV.9.2 Espectroscopia Electrónica de Barrido

Se toman una serie de imágenes de la interfase a través del equipo SEM FEI Quanta 200, Figura IV.43 a la Figura IV.47. Las imágenes muestran la membrana que forma el residuo de la emulsión uniendo los materiales. Es importante tener presente que cuando la emulsión rompe sobre la superficie del sustrato se forma una película continua de residuo durante el proceso de curado.

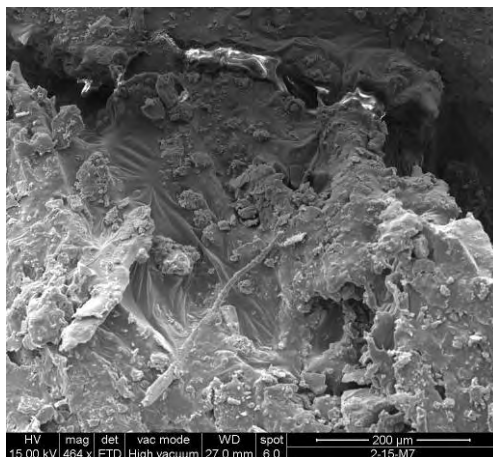


Figura IV.43 Interfase hormigón + emulsión ECRR-M + asfalto

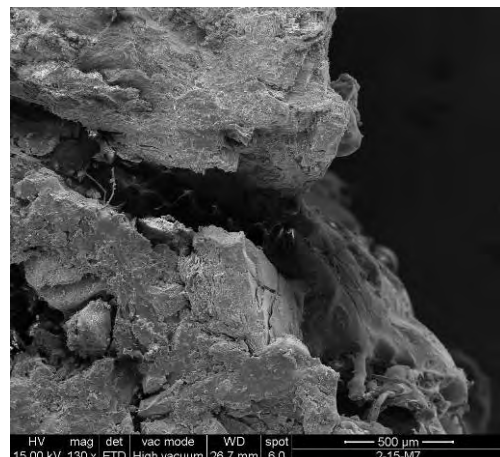


Figura IV.44 Interfase hormigón + emulsión ECRR-M + asfalto

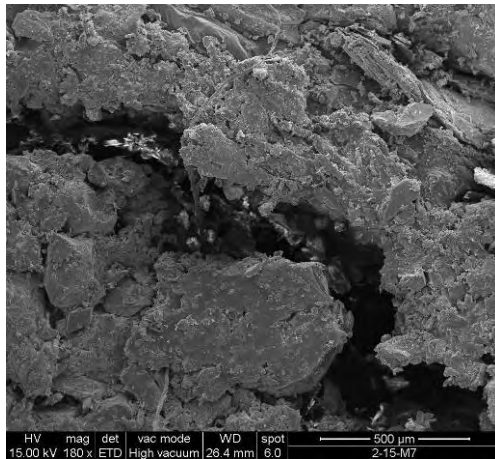


Figura IV.45 Interfase hormigón + emulsión ECRR-M + asfalto

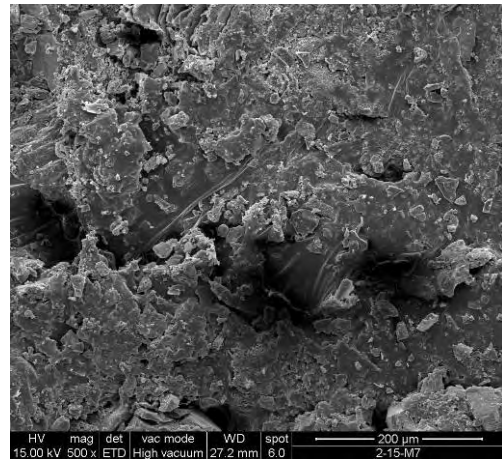


Figura IV.46 Interfase hormigón + emulsión ECRR-M + asfalto

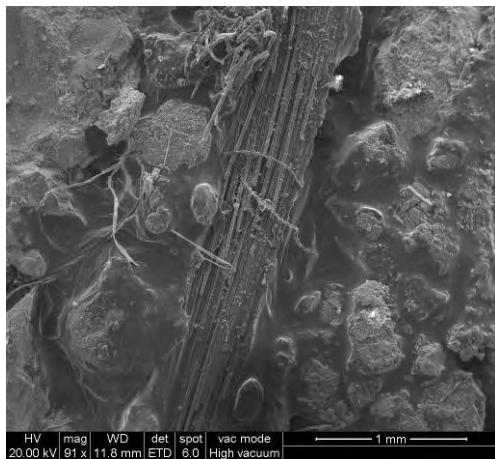
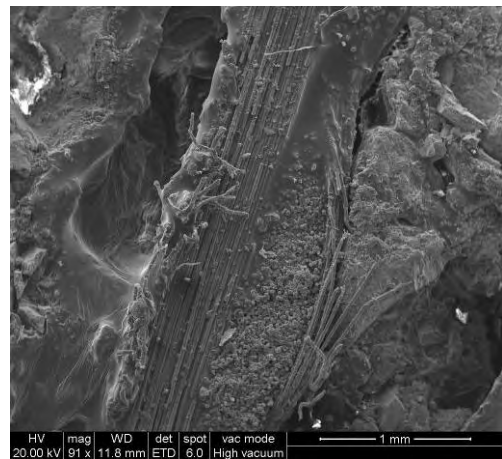


Figura IV.47 Interfase hormigón + emulsión ECRR-M + geosintético + mezcla asfáltica



IV.9.3 Ensayo de Potencial Zeta (Pz, estabilidad de la emulsión)

La interacción de repulsión electrostática proviene de la presencia de cargas eléctricas en la superficie de las gotas y surge porque las gotas semejantes se repelen mutuamente. Estas cargas son aquellas que provienen de las cabezas polares de los emulsificantes. La carga total en la superficie de la gota se puede estimar a partir del potencial zeta.



El potencial zeta se determina mediante la colocación de las partículas coloidales en un campo eléctrico. Esto se hace generalmente con un dispositivo micro electroforesis donde la movilidad electroforética se mide en mili voltios (mV), Figura IV.48.

El potencial zeta esta en función de la concentración de emulsionante y el pH de la emulsión.

Cuanto mayor sea el potencial zeta catiónico, la emulsión es más rápida en la velocidad de rotura. Con bajo potencial zeta se obtiene una emulsión más estable con una velocidad de rotura más lenta. Por lo tanto, la velocidad de rotura de una emulsión es directamente proporcional al potencial zeta de la emulsión. [36] [SALAGER J. 2002].

Existe una zona de inestabilidad de la emulsión que se encuentra entre los valores -20 mV y +20 mV.

La Tabla IV.18 presenta los resultados obtenidos

Tabla IV.18 Resultado de potencial Zeta

Emulsión	Pz (mV)
ETRAD	-21,7
EAI	-25,3
ECRR-M	-32,5

De los resultados obtenidos podemos concluir que las emulsiones resultan ser estables.



Figura IV.48 Equipo para la determinación del potencial zeta



IV.9.4 Determinación de Potencial de Hidrogeno (pH)

El pH es una medida del grado de acidez y alcalinidad de la emulsión. Las sustancias acidas poseen un pH menor de 7 y las bases o alcalinas un pH mayor de 7, siendo neutras para un valor igual a 7. Una misma emulsión se comporta de forma diferente según tenga un pH de 4,5 o de 2,0. La primera tendrá una buena adhesividad, pero su rompimiento será muy rápido; la segunda tendrá una adhesividad dentro de los límites aceptables pero su rompimiento será mucho más lento. [37] [BRACHO C., MERCADO R. y AVELDAÑO J. 2008].

En las emulsiones catiónicas, pasar de un pH= 2 a pH= 3, genera hacer la emulsión más rápida.

La Tabla IV.19 presenta los resultados alcanzados.

Tabla IV.19 Resultados de pH	
Emulsión	pH
ETRAD	6,1
EAI	3,2
ECRR-M	5,3

Podemos concluir que las emulsiones analizadas resultan acidas, de rotura rápida, con buena adhesividad.



Figura IV.48 Determinación del potencial hidrogeno (pH)



IV.10 REFERENCIAS

- [1] Bracho, Carlos Luis [2005]. Emulsiones asfálticas. Cuaderno FIRP S366C. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela.
- [2] Ricci L. A. [2011]. Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercala de geosintético. Tesis de maestría en ingeniería del transporte, orientación vial de la FIUBA. Argentina.
- [3] The Asphalt Institute [1973] Manual del asfalto. Ediciones URMO. ISBN: 8431400870. España.
- [4] Ferre Franquet Pedro [2005]. Las emulsiones de betún. Su química-física. Revista carreteras N° 139. España.
- [5] Giudice Carlos A.; Pereyra Andrea [2009]. Tecnología de pinturas y recubrimientos. Componentes, formulación, manufactura y control de calidad. Facultad Regional La Plata Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N. CONICET - CIC (Bs. As.)
- [6] Transportation Research Board [2006]. Asphalt Emulsión Technology. Transportation Research Board of the national academies, characteristic of bituminous material committe. Number E-C102, pp. 1-58. United states.
- [7] Salager Jean Louis [1992]. El mundo de los surfactantes. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Cuaderno FIRP S311-A. Universidad de Los Andes. Escuela de ingeniería química. Mérida, Venezuela.
- [8] Soengas Cecilia J.; Gonzáles Rubén O. [2006]. Las emulsiones asfálticas. Publicación técnica LEMaC, Centro de Investigaciones



Tesis doctoral de Héctor Luis Delbono. Capítulo IV
Viales. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La
Plata. Argentina.

- [9] Akzo Nobel [1999]. Emulsiones asfálticas. Boletín técnico Akzo Nobel. Suecia.
- [10] Acha, Heliodoro R. y Hernández, Juan J. [2005]. Emulsificación de asfalto modificado con polímero tipo SBS. II Seminario del asfalto. Cancún, México.
- [11] Rodríguez Talavera Rogelio; et al, [2001]. Emulsiones asfálticas. Documento técnico N° 23. Instituto mexicano del transporte. ISSN 0188-7114. Sanfandila Qro. México.
- [12] Rodríguez Muñoz, Esperanza [2006]. Formulación de la emulsión tipo ERC-2P para su aplicación en riegos de sello a baja temperatura. Tesis para obtener la licenciatura en química con área en ingeniería de procesos. Universidad de La Américas Puebla. Cholula, México.
- [13] Akzo Nobel [2003]. Bitumen emulsion. Technical Bulletin.
- [14] Freddy E.; Rolando F. [2002]. Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 y emulsión. Tesis de la Universidad de Piura, Facultad de ingeniería.
- [15] Páramo Jorge; Cassan Roxana [1997]. Manual de diseño para pavimentos de bajo volúmenes de transito. IX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Asunción Paraguay. Tomo I. pp. 309-324



- [16] Fonseca Montejo Alfonso [2002]. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Universidad Católica de Colombia. ISBN: 958-96036-2-9. Bogotá.
- [17] Ferré Pedro [2005]. Las emulsiones de Betún su Química – Física. Apuntes de la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB).
<http://www.ateb.es/pdf/frio/1. las emulsiones de betun su quimica-fisica.pdf>
- [18] Rabiot D.; Morizur M. F. [1996]. Polymer modified bitumen emulsions an advantage for the various road applications. Eurasphalt and Eurobitumen Congress, Strasbourg. Vol. 3 European Asphalt Pavement Association, Netherlands.
- [19] Norma UNE-EN 13808 [2005]. Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones de las emulsiones bituminosas catiónicas. Comité AEN/CTN 51. Productos petrolíferos.
- [20] Orden Circular 322 [1997]. Ligantes bituminosos de reología modificada y mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de pequeño espesor. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras ISBN-13: 9788449803048. 44 p. Madrid.
- [21] Páez Dueñas Antonio y Miro Recasens Rodrigo [2003]. Emulsiones de adherencia resistentes al tráfico de obra. Revista carreteras N° 128. España.
- [22] Potti Juan José [2005]. Innovaciones en ligantes bituminosos. Revista Carreteras N° 139. España.



- [23] Norma IRAM 6691 [2008]. Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas convencionales. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) Argentina.
- [24] Petroquímica Panamericana S. A. Emulsiones asfálticas. Imprimación. www.emulsionesasfalticas.com/imprimaciondoc.htm
- [25] Norma IRAM 6698 [2006]. Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas modificadas. Clasificación y requisitos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Argentina.
- [26] Soenen, Hilde; De Visscher, Joelle; Vanelstraete, Ann y Redelius, Per [2006]. Influence of thermal history on rheological properties of various bitumen. Rheologica Acta 45: pp. 729-739.
- [27] Múmera Ossa Juan Camilo [2012]. Modificación polimérica de asfaltos. Universidad EAFIT, Escuela de ingeniería de Medellín.
- [28] AENOR, UNE-EN 13632 [2004]. Betunes y ligantes bituminosos. Visualización de la dispersión de polímero en betunes modificados con polímeros. 15 p. Madrid.
- [29] Avellán Cruz, Martha Dina [2007]. Asfaltos modificados con polímeros. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [30] Gallego Miralles, Sergio [2004]. Estudio propagación de fisuras en pavimentos asfálticos tratados superficialmente con resina de PU. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña. 172 p. Barcelona.
- [31] Eustathopoulos N.; Nicholas M. G.; Drevert B. [1999]. Wettability at high temperaturas. Pergamon. ISBN: 0080421466.



- [32] Norma UNE-EN 12849 [2009]. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del poder de penetración de las emulsiones bituminosas. España.
- [33] Norma IRAM 6721 [1989]. Método para la determinación de la viscosidad Saybolt Furol. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Argentina.
- [34] Lamontagne, J.; Dumasb P.; Mouillet V.; Kistera J. [2001]. Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens. Fuel 80: pp. 483-488.
- [35] Infrared Spectroscopy Committee [1969]. Its use in the coatings industry. Chicago Society For Paint Technology. 456 p.
- [36] Salager J. [2002]. Fenómenos interfaciales en dispersiones polifásicas y en medios porosos. Cuaderno FIRP S335A. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes. Venezuela.
- [37] Bracho C.; Mercado R.; Alvendaño J. [2008]. Cuaderno FIRP S122. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes. Venezuela.



CAPÍTULO V

CARACTERIZACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS

Se describen los materiales geosintéticos tenidos en cuenta para la investigación y las técnicas actuales de interposición con objeto de prevenir y/o retardar el fenómeno de fisuración refleja.

Se presentan los resultados a tracción realizados sobre los materiales antes y después de ser sometidos a la temperatura de aplicación de la mezcla asfáltica en obra, como así también de los materiales luego de ser embebidos en emulsión asfáltica.

Se caracterizan dichos materiales, bajo normativa IRAM, realizándose ensayos de Espectroscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) de los diferentes materiales.



V.1 DEFINICIÓN

En el ámbito nacional se reconoce como geosintéticos a aquellos materiales que se presentan en forma de fieltro, manto, lámina o estructura tridimensional, los cuales se colocan en contacto con el suelo o con otros materiales, formando parte de obras de geotecnia o de ingeniería civil. En estos materiales, al menos uno de sus componentes posee como materia prima polímeros sintéticos o naturales [1] [UTN LEMaC-INTI CIT, 2003].

Para definir con exactitud que es un material geosintético es conveniente recurrir a las fuentes del conocimiento técnico. "International Geosynthetic Society" (IGS) [2] los define como "Materiales fabricados con polímeros (polipropileno, poliéster, polietileno, etc.) que se emplean para mejorar, aumentar y hacer más económicos proyectos medioambientales, de las infraestructuras de transporte, obras geotécnicas e hidráulicas".

V.2 FUNCIONES

La función de un geosintético se refiere al papel específico que éste cumple dentro de la estructura en la cual se coloca. La función es una tarea o capacidad que se espera que el material desempeñe con efectividad, como complementar, conservar o mejorar el funcionamiento de las estructuras o el sistema constructivo, e inclusive en algunos casos, sustituir parte o completamente los materiales de la construcción tradicional. Una clasificación se incluye en la Tabla V.1.

Un geosintético puede desempeñar más de una función al mismo tiempo para una aplicación dada [3] [HOLTZ ROBERT D. et al., 1998]. Se determina cuál es la función más importante que debe cumplir y sobre esta base se diseña.



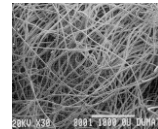
Tabla V.1 Clasificación de los geosintéticos [4] [KOERNER R., 2005]

Geotextiles: materiales permeables que pueden ser “tejidos” o “no tejidos”

Tejido: es una capa producida por el entrecruzado o tejido en telares convencionales de dos series de hilos perpendiculares donde se distinguen dos partes fundamentales: trama y urdimbre. Presentan tenacidades muy elevadas en las direcciones principales de tejido (longitudinal y transversal).



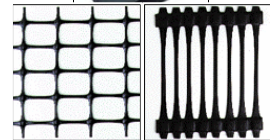
No Tejido: se fabrica mediante fibras que se vuelcan sobre una bandeja en forma aleatoria sin que predomine ninguna dirección de tal forma que se produzca la isotropía del manto. Esta condición (que las propiedades se verifiquen con aproximación en todas direcciones) es una de las importantes innovaciones del no tejido respecto del tejido.



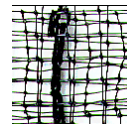
Geomembranas: láminas impermeables y flexibles.



Geomallas, Grillas o geogrillas: estructuras planas con forma de mallas abiertas y regulares de alta capacidad resistente con la posibilidad, de acuerdo al tipo de polímero utilizado, de limitar su capacidad de deformación.



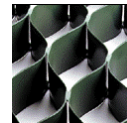
Georred: estructura de tres dimensiones, permeable. Su función principal es la de drenar.



Geodrén: material sintético impermeable con núcleo drenante a través de la cual el líquido fluye.



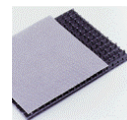
Geoceldas: estructura tridimensional permeable en forma de panal de abeja con espesores importantes para encerrar material entre sus celdas.



Geomantas: estructura tridimensional permeable formada por una red densa de hilados.



Geocompuestos: material compuesto por más de un geosintético. Existen varias combinaciones que favorecen el comportamiento del conjunto en ciertas funciones específicas.



La Tabla V.2 presenta las funciones que éstos desempeñan.

**Tabla V.2 Principales funciones de los geosintéticos**

	Geotextiles	Geocompuestos	Geogrillas	Geomembranas
Separación	X			
Filtración	X	X		
Refuerzo	X	X	X	
Drenaje	X(1)	X		
Protección	X			
Barrera	X(2)			X

(1) En aplicaciones de rellenos sanitarios

(2) Cuando se lo utiliza embebido en asfalto

Estos materiales han tomado gran protagonismo en la construcción de caminos, tanto en obras nuevas como en la rehabilitación de las mismas. Esta importancia no sólo se debe al aumento que este rubro representa en el presupuesto total de las obras, sino también a la importancia de las responsabilidades técnicas para las cuales son diseñados.

Estos materiales presentan una serie de ventajas que son la principal causa del aumento de su empleo en todo el mundo. Entre estas ventajas cabe destacar: la facilidad de puesta en obra, resulta un producto económico, permite ahorros de tiempos de ejecución, posibilita soluciones medioambientales correctas, empleo de mano de obra no calificada y utilización de materiales de calidad verificable [1] [UTN LEMaC-INTI CIT, 2003].

En el campo vial los materiales pioneros de mayor utilización y relevancia han sido los Geotextiles No Tejidos (GNT) embebidos en asfalto, seguidos por las Grillas o Geogrillas (GG), siendo actualmente los Geocompuestos (GC) los que se encuentran en desarrollo.

Actualmente la industria del plástico se encuentra en continuo crecimiento, donde la elección del polímero se realiza en función de las cualidades físicas, químicas y mecánicas (capacidad tensional y de deformación) de acuerdo a la necesidad que la obra demande.



V.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los geosintéticos son materiales elaborados a partir de varios tipos de polímeros. Comprenden productos manufacturados (geoplásticos), materiales que incluyen en su fabricación tecnología textil (geotextiles) y materiales formados por ambas tecnologías textil y plástica [1] [UTN LEMaC- INTI CIT, 2003], Tabla V.3.

Se los puede fabricar basándose en distintos polímeros que determinan sus propiedades y comportamiento:

Tabla V.3 Polímeros utilizados en la fabricación de geosintéticos

Polipropileno (PP)	Poliéster (PET)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Poliamida (Nylon 6,6)
Poliestireno (PS)	Polietileno (PE)	Poli vinil alcohol (PVA)	Otros

Las fibras textiles convencionales, utilizadas en la elaboración de estos materiales, son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas denominadas monómeros [5] [ROMERO G. VIVAR, 2006], Tabla V.4.

La mayoría de los polímeros empleados en la fabricación de los geosintéticos presentan solamente un tipo de monómero y son conocidos como “homopolymers”.

Sin embargo hay otras variantes; para expandir las propiedades estructurales de un polímero se lo puede fabricar a través de la repetición de dos unidades llamados copolímeros (“copolymers”) o tres unidades ter polímeros (“terpolymers”) [6] [MACCAFERRI S. A., 2012].



Tabla V.4 Composición del polímero

Poliétileno (PE)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Cloruro de vinilo (PVC)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{Cl} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Cloruro de polivinilo (PVA)	$\left[\text{CH}_2 - \underset{\begin{array}{c} \\ \text{O} \\ \\ \text{H} \end{array}}{\text{CH}} \right]_n$
Polipropileno (PP)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Poliéster (PET)	$\left[\text{O} - \text{C} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{C} - \text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{O} \right]_n$
Poliestireno (PS)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C} \end{array} \right]_n$ $\begin{array}{c} \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{H} \\ \quad \quad \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$

Fuente: [Rajagopal K. \(2009\) Polymers in Geosynthetics](#)

El número de eslabones de la cadena polimérica es conocido como grado de polimerización, parámetro que se utiliza para evaluar su longitud. En otros casos, la longitud de las cadenas viene determinada en función de su peso molecular.

El peso molecular promedio y su distribución estadística son muy importantes en el comportamiento resultante del polímero.



Con el incremento del peso molecular [6] [MACCAFERRI S. A., 2012]:

- Se incrementa la resistencia a la tracción, su elongación, la resistencia al agrietamiento y al impacto, resistencia al calor.
- Decrece su permeabilidad, su procesabilidad (maleabilidad).

Las orientaciones de las cadenas con respecto al eje de la fibra contribuyen en gran medida a la resistencia de las fibras. Por esta razón, las fibras y otras estructuras orientadas poseen mayor resistencia a la tracción que los plásticos fabricados con el mismo polímero [7] [BOTASSO H. G., 2007].

V.4 FIBRAS PARA GEOSINTÉTICOS

En el ámbito de la industria textil, se denomina fibra al conjunto de filamentos o hebras susceptibles de ser usados para formar hilos o telas, bien sea mediante hilado, tejido o mediante otros procesos físicos o químicos.

Así, la fibra es la estructura básica de los materiales textiles. Se considera fibra textil a cualquier material cuya longitud sea muy superior a su diámetro y que pueda ser hilado [8] [RODRIGUEZ S., 1996], Tabla V.5.

En función de su origen ellas pueden ser:

- Fibras naturales: que se extraen como tales de materiales naturales.
- Fibras químicas: preparadas por el hombre a partir de procesos químicos de transformación de polímeros.
- Fibras químicas artificiales: fabricadas a partir de sustancias poliméricas naturales.



- Fibras químicas sintéticas: fabricadas a partir de sustancias poliméricas obtenidas por síntesis química.

Tabla V.5 Fibras utilizadas en la fabricación de geosintéticos

Fibras	Nombre	Descripción
Sintéticas	Polietileno	Fibra formada por macromoléculas lineales de hidrocarburos alifáticos saturados no sustituidos.
	Polipropileno	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.
	Acrílicas	Fibra formada por macromoléculas lineales cuya cadena esta constituida como mínimo por un 85% en masa de acrilonitrilo.
	Nylon	Fibra formada por macromoléculas lineales cuya cadena presenta una repetición del grupo funcional amida.
	Poliéster	Fibra formada por macromoléculas lineales cuya cadena esta constituida por el 85% de su masa, como mínimo del éster de un diol y ácido tereftálico.
	Fibra de vidrio	Fibra obtenida por fusión del vidrio a través de una pieza de agujeros muy finos (espinerette). Al solidificarse tiene suficiente flexibilidad para ser usado como fibra.
	Polivinil alcohol	Fibra obtenida al disolver alcohol polivinílico en agua caliente hasta dar una disolución espesa, efectuando una hilatura húmeda haciendo pasar los hilos por un baño coagulante que contiene formaldehído y ácidos minerales.



V.4.1 Fabricación de las fibras

V.4.1.1 Fabricación a partir del reciclaje

La obtención del geosintético puede ser realizado a partir de material de reciclaje, lo cual constituye una ventaja importante en la utilización de estos materiales [9] [GONZALES LOBO L., 2011], Figura V.1.

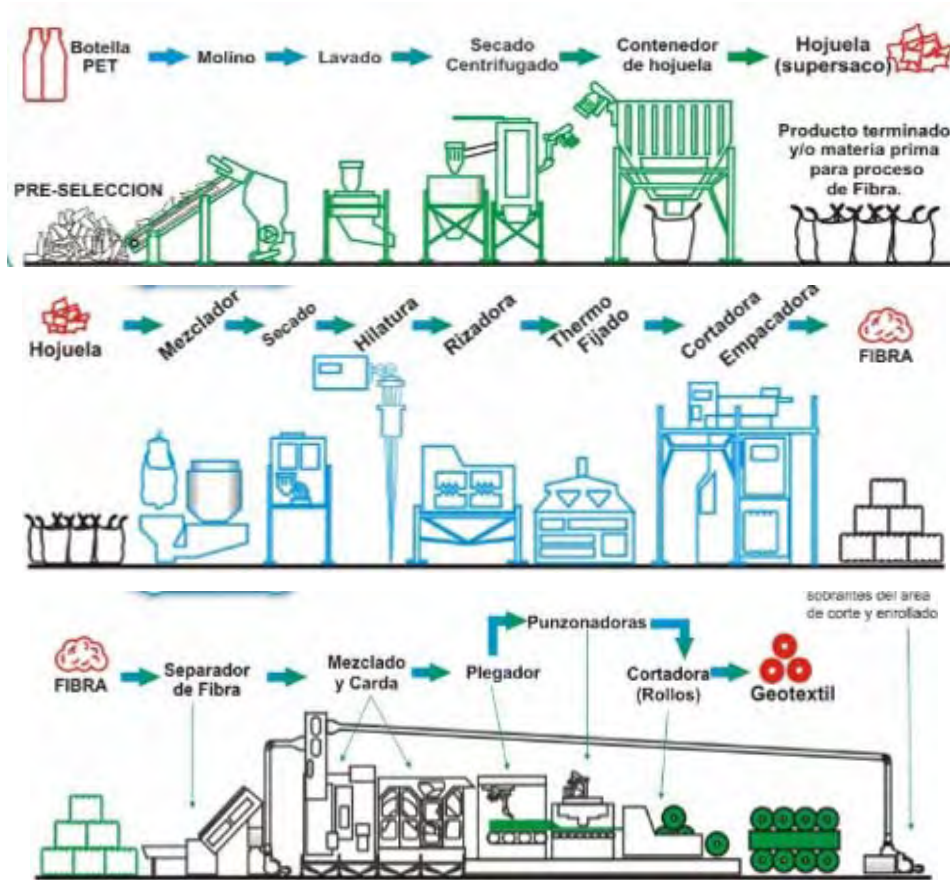


Figura V.1 Producción de un geosintéticos a partir del reciclaje

Fuente [9] [GONZALES LOBO L. 2011]

V.4.1.2 Fabricación a partir de la materia prima "polímero"

Los geosintéticos pueden ser manufacturados a partir de procedimientos de extrusión, con tecnología textil, o bien con la combinación de ambas tecnologías, Figura V.2.



Los geosintéticos nacen de la mano de la industria textil, y como tales su costo depende del número de etapas que intervienen y de la rapidez del proceso de elaboración; mientras menor sea el número de etapas y más rápido el proceso, más económico será el material [10] [HOLLEN, N., 1997].



Estirado

Extrucción

Texturizado

Figura V.2 Proceso de fabricación de las fibras

En la mayor parte de los casos al ser fibras poliméricas termoplásticas, susceptibles a modificarse ante el calor, se fabrican procediendo a la extrusión del fluido de hilatura a través de múltiples agujeros pequeños de una boquilla, de cada uno de los cuales emerge una vena líquida que por solidificación se transforma en un filamento.

Este proceso puede ser por fusión donde el fluido de hilatura es el polímero fundido que se solidifica por enfriamiento en el aire (ejemplo: poliéster, polietileno, polipropileno, etc.).

En el proceso de hilatura en húmedo, el fluido es extruido en un medio líquido o baño de coagulación (ejemplo: Elastano).

En el proceso de hiladura en seco, el fluido de hiladura penetra en una cámara por la que circula aire caliente (ejemplo: acrílicas) [1] [UTN LEMaC-INTI CIT, 2003].

La solidificación de las fibras es por enfriamiento y simultáneamente son estiradas; el estirado reduce el diámetro de la fibra y ocasiona que las



moléculas en la fibra se acomodan en una disposición ordenada, incrementando sus propiedades físicas, elongación a la rotura y su resistencia a la tensión. [9] [GONZALES LOBO L., 2011].

Esos monofilamentos se pueden trenzar juntos para formar una hebra multifilamento. El diámetro de la fibra es caracterizado por un denier, que se define como el peso en gramos de 9000 m de hebra. El término tex asociado a los textiles es el peso en gramos de 1000 m de hebra.

Entre los materiales seleccionados para la investigación, se encuentran diferentes conformaciones de unión de fibras, Figura V.3.

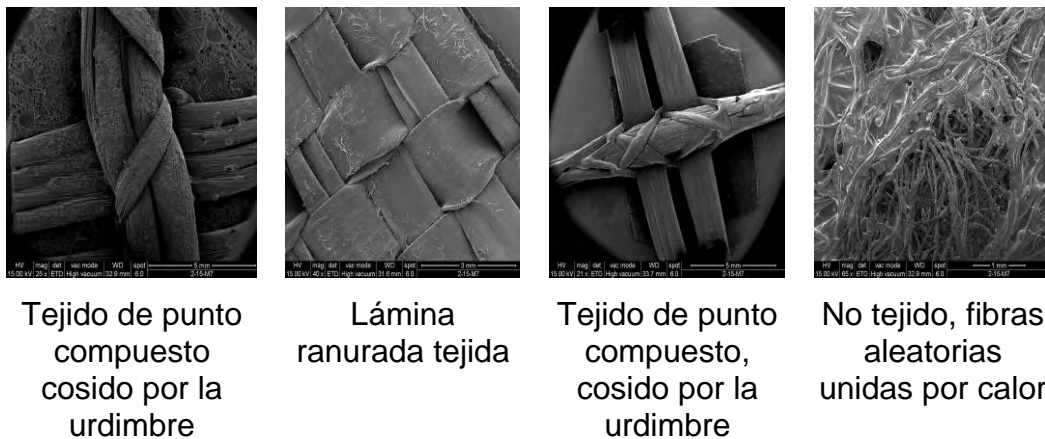


Figura V.3 Opciones de fabricación de las fibras

Fuente: Imágenes SEM obtenidas de los materiales de investigación

El proceso de fabricación tiene influencia en las propiedades de los polímeros y consecuentemente en el geosintético producido a partir de él. Resulta posible mencionar, como efectos asociados al proceso de fabricación, el pre-estiramiento y el porcentaje de cristalización del polímero cambian las características de resistencia a la tracción de las fibras o filamentos e influyen en el comportamiento en fluencia (“creep”) y los aditivos que mejoran la durabilidad [9] [GONZALES LOBO L., 2011].

Ciertos tipos de materiales, como las geogrillas, reciben un tratamiento que consiste en pasarlos por un baño de bitumen, PVC, negro de humo,



etc., para brindarles un recubrimiento de protección o cierta pegajosidad para beneficiar a la adherencia con el pavimento, Figura V.4.

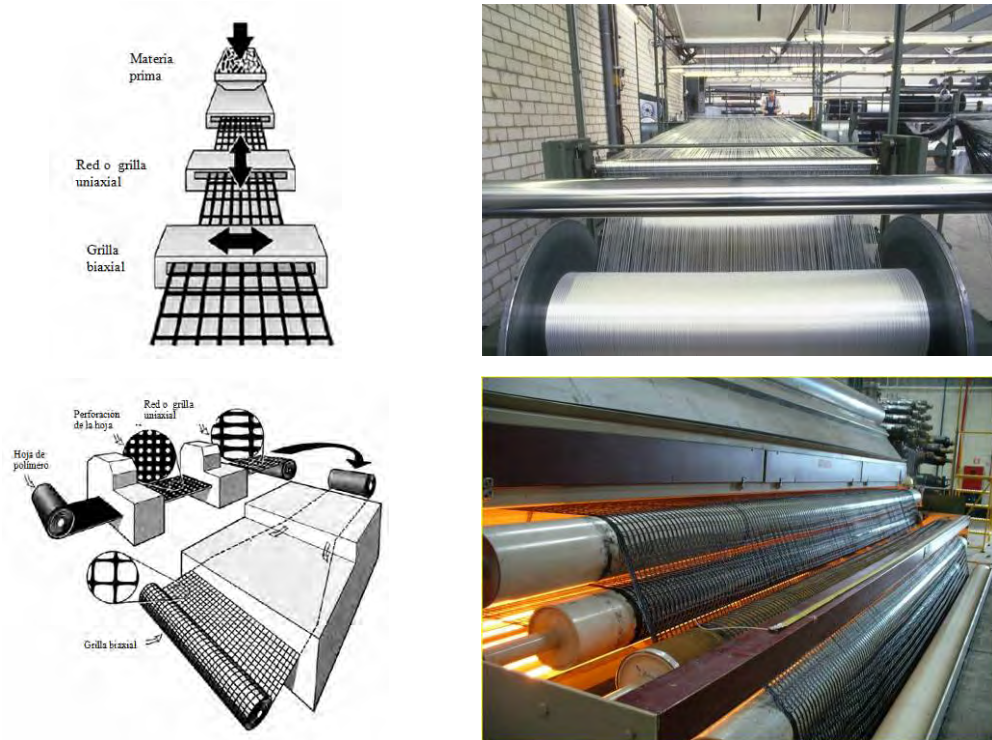


Figura V.4 Fabricación de algunos geosintéticos, en particular las geogrillas

V.4.2 Morfología de las fibras

La sección transversal de una fibra es atravesada por millones de cadenas macromoleculares [1] [UTN LEMaC-INTI CIT, 2003]. En las fibras se pueden distinguir, regiones cristalinas y regiones amorfas. En las primeras las cadenas moleculares se sitúan paralelamente entre ellas, pero no necesariamente con respecto al eje de la fibra. Las regiones amorfas se caracterizan porque los segmentos de las cadenas moleculares se agrupan mucho menos compactos. Las regiones cristalinas aportan a las fibras resistencia a la tracción, estabilidad a la acción del calor y estabilidad a los disolventes. El contenido amorfo de una fibra contribuye a que el tejido sea flexible y suave.



V.4.3 Propiedades de las fibras

Las fibras químicas obtenidas por los diferentes procedimientos de hiladura (fusión, húmedo o seco) poseen la estructura química del polímero componente y una arquitectura que es mucho más versátil que la de las fibras naturales [1] [UTN LEMaC-INTI CIT, 2003]. La arquitectura de la fibra viene determinada por la orientación, cristalinidad y longitud de las cadenas macromoleculares.

La fibra ideal será la que ofrezca una respuesta totalmente satisfactoria a los agentes a los que van a estar en contacto según su función y a su vez brinde un comportamiento textil adecuado. Pero las fibras comerciales deben cumplir ciertos requisitos mínimos que garanticen su cómoda manipulación en las diferentes etapas del proceso textil y durante su uso, siendo una limitante.

Tanto los tratamientos físicos y químicos como la modificación de los parámetros de los hilos y de los tejidos permiten cambiar las propiedades de los tejidos en cierta medida. Sin embargo, las propiedades básicas del tejido son consecuencia de las propiedades físicas y químicas intrínsecas a la estructura del polímero componente de la fibra y son precisamente estas propiedades básicas las que determinan el comportamiento de las fibras en su uso final.

V.4.3.1 Propiedades geométricas

Las fibras se presentan en el mercado en forma de filamento, de fibra discontinua o de cable de filamentos continuos. Los filamentos son fibras continuas y largas, de longitud indefinida. Puede tratarse de monofilamentos o de multifilamentos; éstos corresponden a una agrupación de filamentos que forman un hilo.



V.4.3.1.1 Finura, masa lineal, masa volumétrica

La finura de las fibras se expresa como diámetro aparente o como masa lineal. El diámetro viene dado en μm (micras) y la masa lineal en tex (peso en gramos de 1000 m de hilo). La masa lineal depende del grosor de la fibra o hilo pero también de su peso específico o densidad. La densidad o masa volumétrica de una fibra depende de su estructura química y del agrupamiento más o menos apretado de las cadenas moleculares.

V.4.3.1.2 Forma de la sección transversal

La forma de la sección transversal influye en el volumen, cuerpo, poder cubriente, rigidez a la torsión y a la flexión de las fibras, hilos y tejidos con ellas fabricados, Figura V.5.

La forma de la sección transversal de las fibras químicas depende de las características de cada polímero, la forma de obtención de las fibras y los dispositivos empleados que tiene la hilera, del método y condiciones de hiladura. La hiladura en húmedo suele conducir a fibras de sección transversal redonda o arriñonada y las fibras hiladas en seco poseen habitualmente secciones transversales con forma de hueso de perro [11] [FERNANDEZ CALVO C., 2006].



Figura V.5 Sección transversal de las fibras

La forma de los filamentos que forman la fibra utilizada en la producción de los materiales en poliéster, poli vinil alcohol y fibra de vidrio tienen forma redondeada, Figura V.6 (izquierda), mientras que el geocompuesto a base de polietileno tiene forma de lámina, Figura V.6 (derecha).

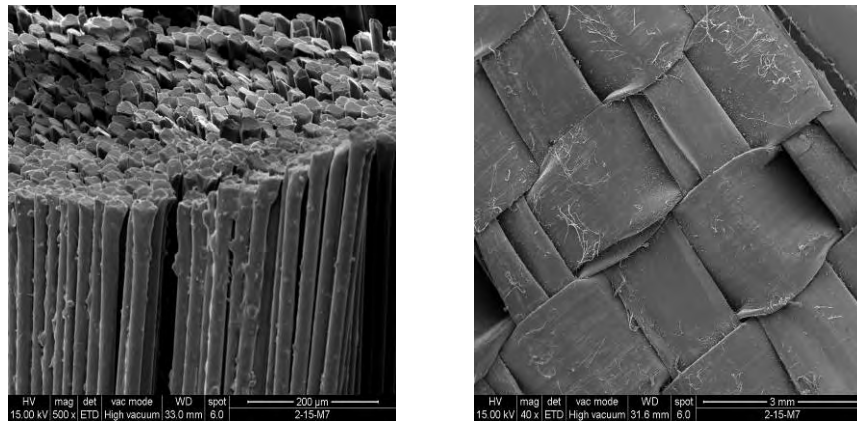


Figura V.6 Forma redondeada, izquierda; forma de lámina, derecha

V.4.3.1.3 Comportamiento a tracción

Cuando el diagrama carga/alargamiento corresponde a una línea recta la fibra es verdaderamente elástica, Figura V.7.

Cuando la carga aplicada a una fibra es mayor que la necesaria para producir una cierta elongación, la deformación que experimenta es mayor que la que le correspondería a un comportamiento elástico.

El resultado es un alargamiento adicional que se traduce en una deformación más o menos permanente de la fibra (deformación plástica). A medida que aumenta la tensión, la fibra continúa deformándose hasta que eventualmente rompe.

Las coordenadas del punto de rotura se conocen como tenacidad (ordenada) y elongación (abscisa).

Se realizan ensayos a tracción de los materiales considerados, los mismos se ejecutan en ambiente acondicionado a temperatura de 22 °C con humedad del 65%, los resultados se presentan en el Punto V.8.3.

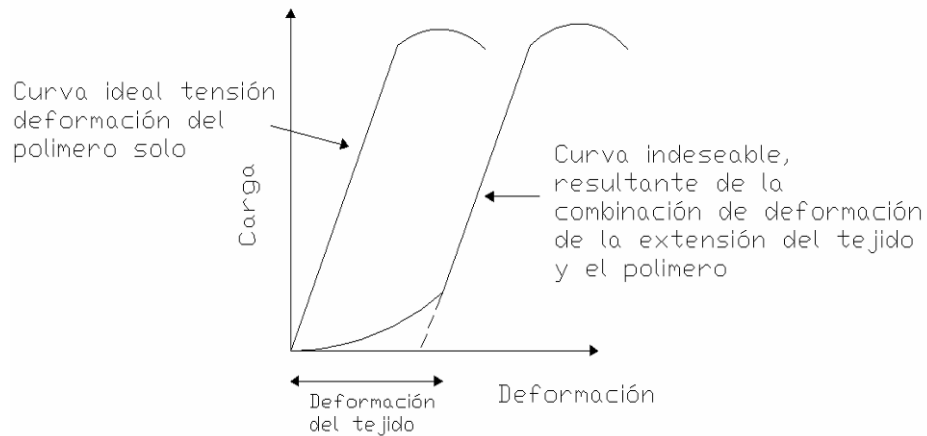


Figura V.7 Carga vs. deformación de polímeros

Fuente [1] [UTN LEMaC- INTI CIT, 2003]

V.4.3.2 Propiedades térmicas

V.4.3.2.1 Acción del calor

La temperatura de fusión y la de transición vítrea (T_g) son probablemente los parámetros térmicos más importantes de las fibras y de sus polímeros componentes, Figura V.8.

Es imprescindible que las fibras no fundan en condiciones normales de uso, pues a la temperatura de fusión se produce un derrumbamiento completo de la arquitectura de la fibra, ya que se destruyen las regiones cristalinas.

El conocimiento de la temperatura de fusión es necesario para programar la temperatura de determinados tratamientos térmicos (termofijado).

Conviene señalar que no todas las fibras funden, ya que algunas se descomponen antes de alcanzar la temperatura a la que, en función de su estructura química, deberían hacerlo.

La temperatura de transición vítrea (T_g) influye mucho más en las condiciones de procesamiento de los productos textiles. A esta temperatura se



produce un ablandamiento, aflojamiento o movilidad de las regiones amorfas de la fibra, de tal modo que se hacen más penetrables y más moldeables.

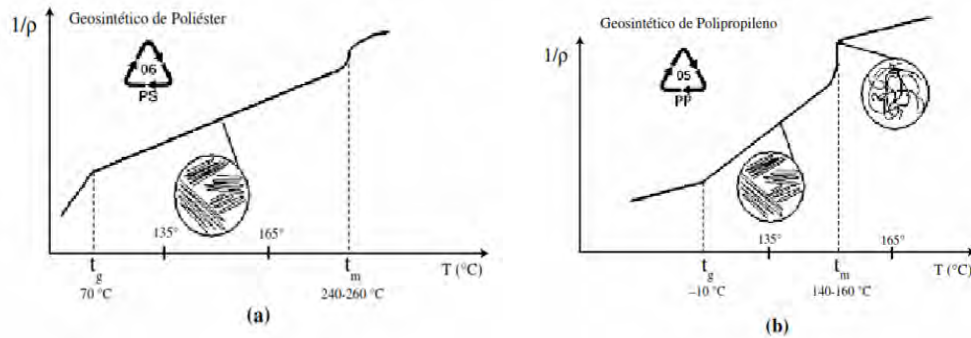


Figura V.8 Comportamiento termo gravimétrico a) del poliéster; b) del polipropileno, en exposición a temperatura de ensayo

Fuente: [12] [CONTRERAS N. J., 2009]

La Tabla V.6 presenta las temperaturas de transición vítrea, fusión y descomposición de algunos termoplásticos.

Tabla V.6 Temperatura de transición vítrea (Tg), fusión (Tf) y descomposición (Td) de termoplásticos

(°C)	PE	PET	PVC	PVA	PP
Tg	-115	69	81	85	-20
Tf	137	265	212	255	176
Td	406	280-320	-	-	155

Fuente: [13] [BILLMEYER F. W., 2004]

V.4.3.2.2 Termofijado

Es el que se aplica sobre productos de fibras sintéticas para estabilizar el tejido a la acción de un tratamiento térmico posterior.

Mejora su estabilidad dimensional y de forma; ello se debe a la relajación de las tensiones impartidas a las fibras.



V.4.3.2.3 Fibras termoligantes

La temperatura de fusión no es alcanzada en ningún proceso textil; sin embargo, algunas fibras se fabrican para utilizarlas como fibras termoligantes por fusión o al menos reblandecimiento. El principal campo de aplicación de estas fibras es el de las telas no tejidas; su fabricación requiere un mezclado de las fibras y un calandrado en caliente. Como fibras termoligantes se pueden citar las de polietileno y polipropileno.

V.4.3.3 Acción de la intemperie

Son diversos los factores que influyen e interaccionan en la importancia de la degradación resultante:

- Duración de la exposición.
- Intensidad y composición de la luz solar.
- Humedad relativa y temperatura del medio circundante.

Para conocer los efectos producidos por las radiaciones solares se suele medir la resistencia a la tracción, el alargamiento a la rotura, etc. La exposición de una fibra a la acción de la intemperie se puede traducir en un ataque químico del que deriva un empeoramiento de sus propiedades de resistencia.

V.5 GEOSINTÉTICOS EN MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS

El uso de tejidos en los pavimentos se reportó por primera vez en la década de 1930 cuando Beckham y Mills (1935) sugirieron las fibras de algodón como un sistema de capa intermedia en pavimentos flexibles en Carolina del Sur [14] [AL-QADI IMAD L. et al., 2008].

Hoy en día, el uso de fibras de algodón, no resulta la mejor alternativa para el refuerzo, pero el concepto sigue siendo el mismo.



Con el gran avance de la tecnología, la conformación de grillas poliméricas se inicia en Francia con el empleo de grillas de fibra de vidrio y en Alemania con fibras en poliéster. En Argentina, aparecen durante los primeros años de la década del '70, siendo materiales importados hasta el día de la fecha.

En el mercado se ofrecen geosintéticos de diferente composición polimérica y conformación para la pavimentación, los cuales combinados con una capa de ligante asfáltico, ofrecen una barrera contra la humedad en todo el ancho del camino. Estos son conocidos dentro de la rama de los geosintéticos como geocompuestos, donde intervienen diferentes materiales poliméricos o procesos de conformados, Figura V.9.

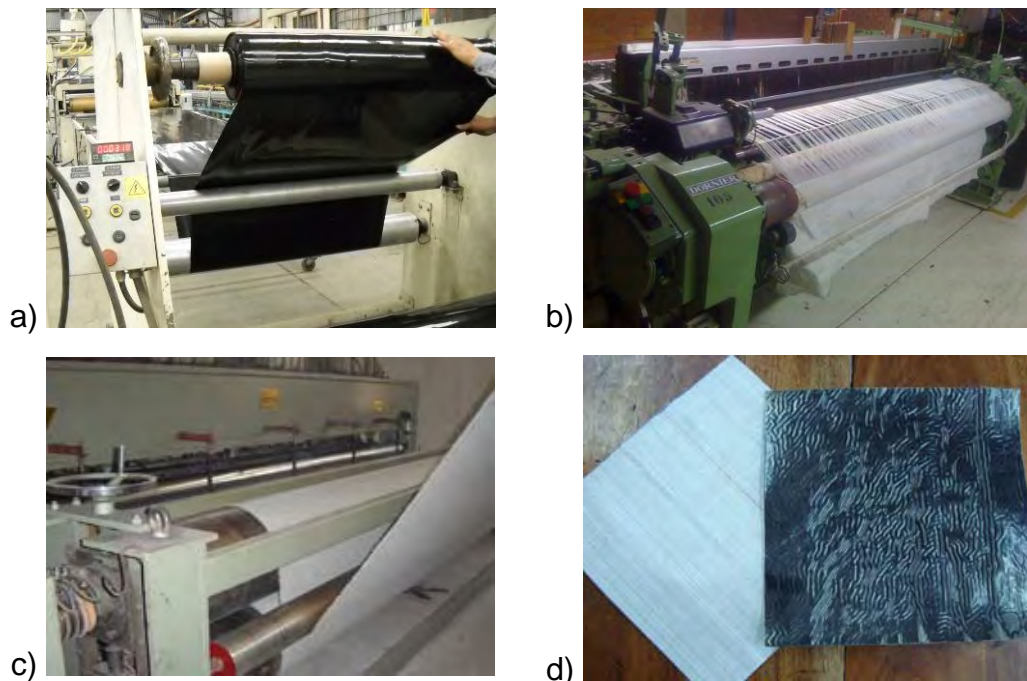


Figura V.9 Producción de un geocompuesto: a) fabricación membrana base; b) producción del geotextil tejido; c) unión de los materiales a y b para conformar el geocompuesto (d); d) material final al cual se le adosa un film para conservar la membrana

El efecto de los geocompuestos en la duración de la superficie de pavimentos y su incorporación en las capas es un mecanismo complejo que está determinado por diversos parámetros: tipo de falla, tipo de tejido y conformación, tipo de mezcla asfáltica, impregnación, estructura y



rugosidad de la superficie y procedimiento constructivo. No es posible evaluar el rendimiento de los tejidos para pavimentos considerando simplemente su resistencia a tracción.

V.5.1 Materiales geosintéticos seleccionados para la investigación

Los materiales seleccionados para estudiar el fenómeno de propagación de fisuras y la adherencia en la interfase del sistema, fueron proporcionados a partir de varios convenios firmados con importantes empresas.

Mediante el convenio empresa Alemana HUESKER Ltda, con sede en Brasil, se importaron materiales a base de fibras en poliéster (PET), ampliamente utilizados en la repavimentación y, los fabricados fuera de la línea de producción, en poli vinil alcohol (PVA); ambos materiales tienen adosado un geotextil no tejido en polipropileno. El material es cubierto completamente con un recubrimiento bituminoso. Se denomina a estos materiales como HSK PET y HSK PVA, respectivamente.

La empresa MACCAFERRI S. A. de Brasil proporciona el material geosintético a partir de fibras en poliéster con base de un geotextil no tejido en polipropileno. Este material con recubrimiento polimérico se lo denomina en la presente tesis como MAC PET.

De esta empresa también se utiliza en las experiencias un Geotextil No Tejido en poliéster de 150 g/m^2 , el cual es embebido en emulsión asfáltica modificada con polímero SBS; el mismo constituye uno de los sistemas más utilizados en la problemática de la fisuración refleja en nuestro país. A este material se lo denomina como GNT PET 150 g.

En el transcurso de la investigación, mediante transferencia tecnológica con la empresa FAMEIM S. A. de Argentina, se desarrolla y caracteriza un nuevo material, compuesto por capas de un Geotextil Tejido en polipropileno adosado a una membrana asfáltica. Este material fue



realizado en varios espesores, conformado por una o dos capas de geotextil tejido en polipropileno con una o dos capas de membrana asfáltica, buscando prevenir la problemática del reflejo de fisura y la adherencia entre capas. A este material se lo denomina FM PP, teniendo una variante a la cual se la define como FM PP arena donde se le incorpora una membrana asfáltica superficial con arena impregnada.

Esta misma empresa, más tarde, brinda una grilla a partir de fibras de vidrio con un recubrimiento bituminoso. A este material importado, se lo llama GR FV.

Se incorpora un nuevo material a la investigación, a través de convenio con la empresa CORIPA S. A., al que se lo denomina RBK PET, el cual consiste en una membrana asfáltica con fibras en poliéster distribuidas aleatoriamente en su masa.

Como innovación, en base a resultados logrados por los materiales antes mencionados, se implementa un material compuesto por una membrana asfáltica de características similares a la de un sellador asfáltico adosado a una malla de fibras en poliéster, al que se lo denomina en las experiencias como Membrana + HSK PET.

Todos los materiales son caracterizados siguiendo la normativa IRAM y se realizan ensayos de acuerdo a la circunstancia de obra que estos materiales deben afrontar cuando se los coloca entre capas de un pavimento.

Se busca en este material combinar las propiedades de una malla de alta resistencia con la ventaja de impermeabilización que brinda una membrana asfáltica

La Figura V.10 muestra la estructura de los materiales geosintéticos.



FM PP

Geocompuesto conformado por un geotextil tejido en polipropileno adosado a una membrana asfáltica



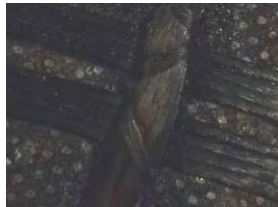
RBK PET

Geocompuesto conformado por fibras en poliéster distribuidas aleatoriamente en la masa de una membrana asfáltica



MAC PET

Geocompuesto conformado por fibras en poliéster unidas por puntos a una geotextil no tejido en polipropileno, de malla cuadrada de 40x40 mm con recubrimiento bituminoso



HSK PET y PVA

Geocompuesto conformado por fibras en poliéster o polivinil alcohol unidas por puntos a una geotextil no tejido en polipropileno, de malla cuadrada de 40x40 mm con recubrimiento bituminoso



GNT PET 150 g

Geotextil No Tejido compuesto por fibras en poliéster orientadas en forma aleatoria



GR FV

Geogrilla compuesta por filamentos en fibra de vidrio con un recubrimiento bituminoso, de malla cuadrada de 20x20 mm

Figura V.10 Materiales geosintéticos

V.5.2 Influencia de la temperatura

Según su composición, los geosintéticos como todo material polimérico son, en mayor o menor medida, susceptibles a los cambios de temperatura, pudiendo variar sus propiedades en función de la exposición de la misma [15] [VANDEN EUNDE S., 2000].



Una propiedad en particular no usualmente considerada antes de la elección de un geosintético es el comportamiento del mismo durante la aplicación de la capa de mezcla asfáltica. De ahí que estudiar su comportamiento térmico es fundamental cuando sobre el material se coloca y compacta una capa asfáltica a temperaturas que oscilan entre 140 °C y 160 °C, Figura V.11. Es importante verificar la temperatura admisible del polímero empleado en la confección del material geosintético, el cual debe ser resistente a la temperatura de aplicación de la mezcla asfáltica y a las sollicitaciones mecánicas de instalación.



Figura V.11 Colocación en obra de mezcla asfáltica sobre el geosintético

Por ello se plantea el estudio de la resistencia a tracción del material luego de ser sometido a diferentes temperaturas de colocación y compactación de mezcla asfáltica sobre el material geosintético. El ensayo consistió en:

Método 1: medición de la resistencia a tracción de los materiales luego de ser sometidos a una temperatura de 140 °C y 160 °C, adquirida por convección al estar en contacto con el aire en estufa durante una hora.

El procedimiento consiste en llevar a estufa muestras más pequeñas para ver su comportamiento frente a la temperatura, Figuras V.12, V.13 y V.14.



Figura V.12 Muestras antes de ser sometidas a temperatura por convección en estufa

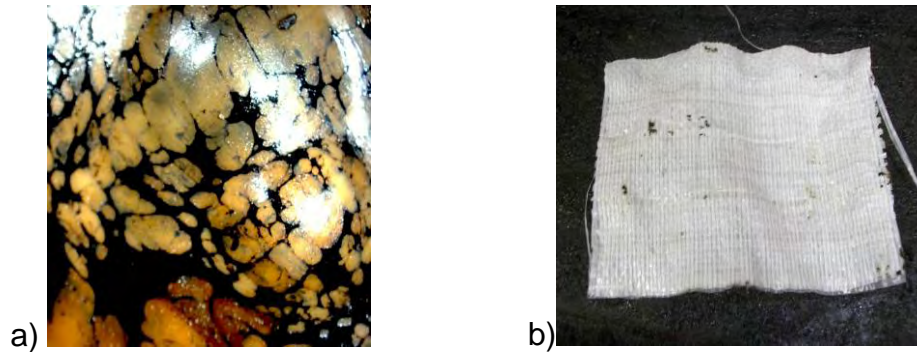


Figura V.13 Observación de muestras luego de ser sometidas a 140 °C por convección en estufa durante una hora



Figura V.14 Observación de muestras luego de ser sometidas a 160 °C por convección en estufa durante una hora

La Figura V.15.a permite visualizar cómo la estructura del geotextil tejido en polipropileno adosado a la membrana asfáltica (material FM PP) se desintegra al alcanzar los 160 °C. La membrana presenta un punto de fusión cercano a los 100 °C, siendo esta la que absorbe rápidamente mayor temperatura y la responsable de descomponer el material tejido en polipropileno. El geotextil tejido en polipropileno, sin estar adosado a la membrana, no se funde al alcanzar 160 °C, Figura V.15.b.



**Figura V.15 Muestra FM PP sometida a 160 °C en estufa
a) Membrana con geotextil; b) Geotextil sin membrana**

Siendo los demás materiales más estables, se tomaron muestras de 200 mm de ancho por 300 mm de largo para analizar los cambios volumétricos, luego de ser sometidos a 140 °C y 160 °C en estufa.

Como resultado del análisis, MAC PET y GR FV mantuvieron prácticamente las dimensiones después de ser retirada de la estufa, Figura V.16; por su parte, HSK PET y HSK PVA redujeron sus dimensiones en un 32% en promedio cuando fueron sometidas a 160 °C y un 13% cuando se sometieron a 140 °C, Figura V.17.

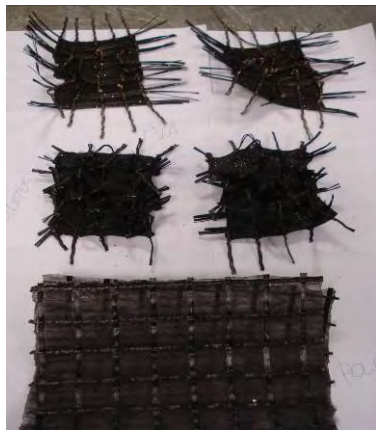


Figura V.16 Muestras después de ser sometidas a 140 °C en estufa durante una hora



Figura V.17 Muestras después de ser sometidas a 160 °C en estufa durante una hora

En este caso se puede apreciar que el geotextil no tejido en polipropileno de base no funde a la temperatura de 140 °C, pero sí comienza a hacerlo a los 160 °C.



Bajo estas condiciones no fue posible verificar las resistencias obtenidas debido a la dificultad de centrar los filamentos en las mordazas del dispositivo de ensayo. La Figura V.18 muestra la disposición de las muestras en las mordazas.



Figura V.18 Ensayo de tracción luego de ser sometido el material a temperatura por convección en estufa durante una hora

Bajo estas condiciones los resultados obtenidos presentaron pérdidas de resistencia hasta en un 50%; reiteramos que no son valores confiables por la disposición del material durante el ensayo.

Método 2: medición de la resistencia a tracción de los materiales geosintéticos después de ser sometidos a una temperatura de 140 °C y 160 °C, alcanzada por conducción al estar en contacto con la mezcla asfáltica en caliente.

El procedimiento consiste en calentar la mezcla asfáltica en baño de aceite hasta alcanzar las temperaturas indicadas, para luego colocarlas sobre las muestras y compactarlas mediante pisón manual.

Se realiza la compactación manual aplicando los golpes en franjas horizontales para distribuir la mezcla en forma homogénea, Figura V.19.



Figura V.19 Ensayo de tracción luego de ser sometido el material a 140 °C y 160 °C por conducción al estar en contacto con la mezcla asfáltica en caliente

La Tabla V.7 muestra la resistencia (KN/m) y deformación (mm) alcanzada por los diferentes materiales geosintéticos al ser ensayados a tracción, en el sentido de fabricación del material, luego de ser sometidos a la colocación y compactación de la mezcla asfáltica en caliente a diferente temperatura.

Tabla V.7 Valores obtenidos a tracción para los geosintéticos sometidos a diferente temperatura. Valores arrojados por la máquina

Material	Sentido del rollo sin contacto con mezcla		Sentido del rollo sometida a 140 °C		Sentido del rollo sometida a 160 °C	
	Carga	Def.	Carga	Def.	Carga	Def.
	(KN/m)	(mm)	(KN/m)	(mm)	(KN/m)	(mm)
HSK PET	41,43	17,25	37,76	15,30	36,40	13,87
RBK PET	15,30	50,16	16,40	67,01	14,31	62,77
MAC PET	38,47	15,65	32,18	20,01	30,79	25,35
FM PP	28,04	21,04	31,23	28,42	29,49	28,95
GR FV	44,58	2,52	39,80	2,41	27,89	3,89
HSK PVA	39,92	8,24	40,52	9,90	38,96	9,42



La Figura V.20 y Figura V.21 indica la carga y la deformación respectivamente de los materiales geosintéticos luego de ser sometidos a diferente temperatura.

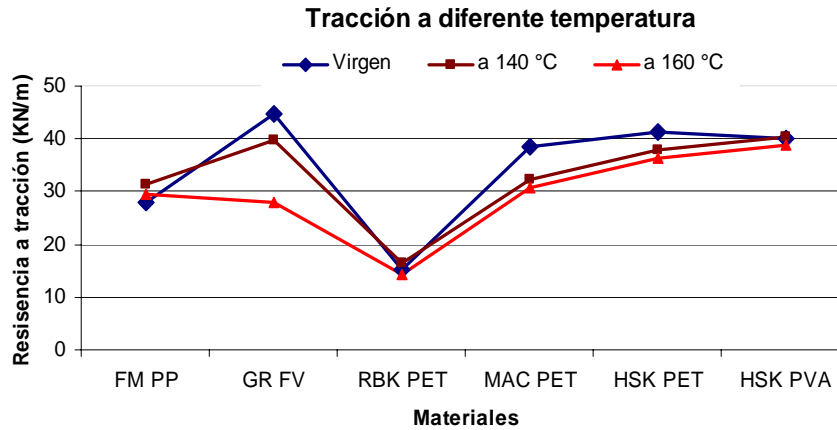


Figura V.20 Resistencia a tracción de los materiales expuestos a diferente temperatura de mezcla asfáltica

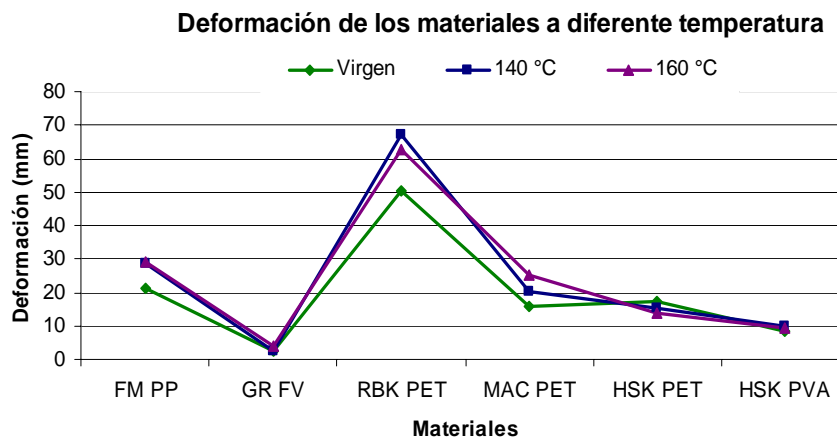


Figura V.21 Deformación, por tracción, de los materiales expuestos a diferente temperatura de mezcla asfáltica

Los resultados obtenidos evidencian que para el caso del material HSK PET, MAC PET y GR FV los valores de resistencia disminuyen levemente con pequeños cambios en su deformación.

El material RBK PET sufre un considerable aumento en su deformación manteniendo el nivel de resistencia, sufriendo una rotura frágil. Esto se



debe a la orientación de las fibras en poliéster en dirección de aplicación de la carga.

El material FM PP por su parte manifiesta un incremento en su resistencia última con aumento en su deformación evidenciado en una rigidización del material luego de someterla a la temperatura de la mezcla asfáltica.

V.5.2.1 Ensayo de punto de fusión y ablandamiento

Uno de los ensayos realizados en cuanto a la temperatura es el Punto de Fusión y el Punto de Ablandamiento según [ASTM D 1525] [16] debido a que se presentaron problemas sobre el material base de polipropileno, el cual no funde con la temperatura de la colocación y compactación de la mezcla asfáltica cuando ésta alcanza los 160 °C; ello resulta un gran problema cuando se requiere ligar las capas. El ensayo se realiza sobre:

- a. Muestra virgen (geotextil no tejido en polipropileno, fondo HSK PET y HSK PVA), Figura V.22.
- b. Muestra extraída luego de compactada la mezcla sobre el material impregnado con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS de rotura rápida, Figura V.23.

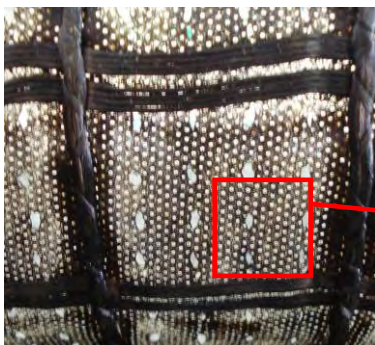


Figura V.22 Muestra virgen

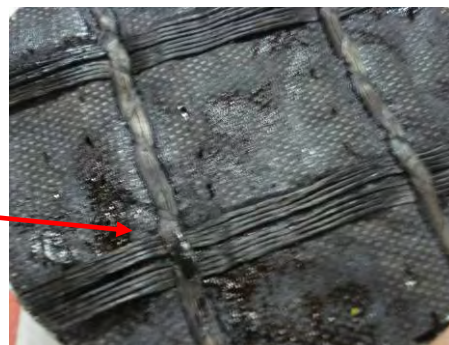


Figura V.23 Muestra + emulsión modificada (ECRR-M)

El procedimiento consiste en:



- c. Sobre la muestra virgen se toman estrictamente especímenes del geotextil no tejido en forma aleatoria.
- d. Sobre la muestra descrita en b se toman especímenes del geotextil no tejido en forma aleatoria.

El equipo para determinar el punto de fusión se muestra en la Figura V.25. Del ensayo se obtienen los siguientes resultados:

a. Muestra del geotextil no tejido en polipropileno:

- a.1 Punto de ablandamiento = 89 °C
- a.2 Punto de fusión (ver punto b.4) = aprox. 157 °C (valor medio)

b. Muestra del geotextil no tejido en polipropileno impregnado con emulsión asfáltica modificada: al tratarse el asfalto de un material termoplástico no se puede hablar académicamente de punto de fusión sino de punto de ablandamiento [17] [SHACKELFORD J. F., 2005].

Sobre la muestra se realizan las siguientes determinaciones:

- b.1 Punto de ablandamiento = 48 °C
- b.2 Punto de ignición, ASTM D 92 = 189 °C
- b.3 Punto de llama, ASTM D 92 = 221 °C
- b.4 Punto de fusión, en un amplio rango de temperatura por su característica intrínseca y por lo tanto con valor académico relativo = aprox. 178 °C (valor medio)

El ensayo revela algo muy importante, lo cual fue evidenciado en las obras y en los ensayos de adherencia realizados en la parte experimental. Por un lado el punto de fusión del geotextil no tejido en polipropileno, adherido a las fibras del material, registra un valor medio de 157 °C en el entorno de los 155 °C especificados en la cartilla técnica del material como temperatura máxima que resiste en contacto con el asfalto.



La temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en obra, para una mezcla del Tipo densa convencional (CAC D20), requiere normalmente una temperatura de colocación del orden de los 155 °C, por lo cual si ésta no se coloca a la temperatura establecida, el geotextil no llega a su temperatura de fusión.

Por otra parte se observa que los puntos de ignición y de llama están suficientemente alejados de las temperaturas de trabajo, otorgándole un razonable margen de seguridad operativa.



Figura V.24 Equipo para determinar el punto de fusión

Ahora bien, siguiendo con el análisis del ensayo, al impregnar el geotextil en polipropileno con emulsión modificada, si bien es difícil establecer un punto de fusión del conjunto, se puede decir que el mismo alcanza un valor aproximado de 178 °C, temperatura que sobrepasa la de la colocación de la mezcla asfáltica sobre el material, situación que debe ser considerada a efectos de justificar cambios en el comportamiento del material cuando se lo coloca sobre un riego asfáltico con objeto de ligar los materiales.

El geotextil no tejido en polipropileno no interviene en el retardo de las fisuras; se lo utiliza con objeto de facilitar la instalación del material sobre el pavimento. Sin embargo, sí hace a la adherencia entre capas, disminuyendo el contacto entre las mismas y por ende perjudicando el comportamiento global del sistema.



En el Capítulo VII se presentan los resultados obtenidos de adherencia entre capas para los casos donde el material ha fundido y cuando no lo ha hecho.



Figura V.25 Geotextil en polipropileno no fundido

Contemplando el punto de fusión del conjunto de 178 °C, se realiza la determinación de la resistencia a tracción del material HSK PET, luego de ser sometido, durante una hora, a diferentes condiciones de ensayo: (A) virgen en estufa a 180 °C, (B) impregnado con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS en estufa a 180 °C, (C) virgen sometido con mezcla asfáltica a 180 °C (D) impregnado con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS y sometido con mezcla asfáltica a 180 °C, Figuras V.26 a V.29. La Tabla V.8 presenta los resultados obtenidos.

Tabla V.8 HSK PET sometido a diferentes condiciones de ensayo

Condición de ensayo	Carga (KN/m)	Deformación (mm)
Estufa (virgen)	23,00	24,63
Estufa (impregnado)	19,55	30,87
Mezcla asfáltica (virgen)	36,21	20,60
Mezcla asfáltica (impregnado)	33,28	19,68

Comparativamente con los resultados presentados en la Tabla V.7 para el material HSK PET sometido a diferentes temperaturas de la mezcla asfáltica (140, 160 y 180 °C) se evidencia la pérdida de resistencia del material HSK PET a medida que aumenta la temperatura con modificaciones en su deformación.



Analizando los resultados de la Tabla V.8 se observa que el material impregnado con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS, luego de ser sometido en estufa, presenta menos resistencia a la tracción a mayor deformación del material.

Para el material recuperado, tanto virgen como impregnado, luego de ser sometido a la mezcla asfáltica a 180 °C, se observa que el nivel de resistencia a tracción disminuye levemente, manteniéndose el nivel de deformación cuando el material es impregnado. Los resultados avalan la utilización del material en la restauración de pavimentos con mezcla asfáltica.



Figura V.26 Preparación muestras



Figura V.27 Muestras recuperadas impregnadas



Figura V.28 Muestras recuperadas de la mezcla asfáltica a 180 °C



Figura V.29 Muestra sometida a tracción

V.5.2.2 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier

Se realiza el ensayo sobre el material virgen y el material impregnado con la emulsión modificada para determinar posibles cambios en su composición.



La Figura V.30 muestra en rojo el espectro obtenido para el material virgen. Se evidencia un efecto sinérgico del material luego de ser mojado por la emulsión asfáltica. El rango de vibraciones $3550-3150\text{ cm}^{-1}$ corresponde al estiramiento N-H, presentando dos picos marcados a 2930 cm^{-1} y a los 2850 cm^{-1} por la presencia del grupo C-H.

Entre los 2850 cm^{-1} y los 1700 cm^{-1} el material se comporta sin cambios de importancia manifestado por el enlace C-C. Entre los 1750 cm^{-1} y los 1600 cm^{-1} presenta una nueva reacción química. A los 1450 cm^{-1} presenta un pico característico del doble enlace C=C. A baja vibraciones, entre los 950 cm^{-1} a 650 cm^{-1} se hace presente el enlace C-H.

El efecto sinérgico evidenciado explica la alternación de las propiedades térmicas del material al entrar en contacto con la emulsión asfáltica, viéndose afectadas las propiedades químicas del mismo.

El espectro correspondiente a la muestra de geotextil no tejido en polipropileno, luego de ser mojado por la emulsión, presenta vibraciones más fuertes del grupo amino a los 2930 cm^{-1} como consecuencia del contacto con la emulsión asfáltica. A los 1450 cm^{-1} también se presenta un pico más marcado correspondiente al doble enlace C-C.

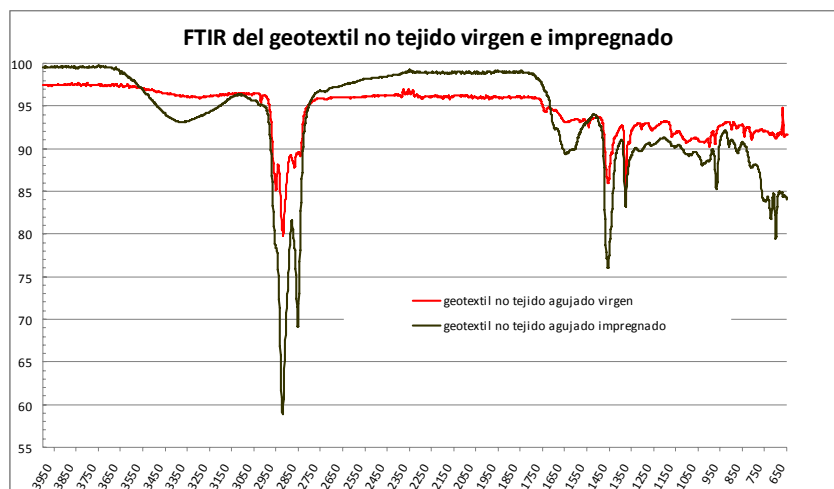


Figura V.30 Espectro IR del geotextil virgen e impregnado con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS



Se debe tener presente que el punto de ablandamiento del polímero constituyente de las fibras, es decir, la temperatura para la cual las grillas pierden sus condiciones resistentes, debe ser lo suficientemente elevado para que la temperatura de aplicación de la mezcla asfáltica no le ocasione deterioros irreversibles.

V.6 EXPERIENCIA CON GEOSINTÉTICOS

Numerosas investigaciones han sido desarrolladas considerando la intervención de los geosintéticos como sistemas anti-reflejo de fisuras. [18] [JAYAWICKRAMA y LYTTON, 1987]; [19] [LYTTON R. L., 1989]; [20] [KIM J., BUTLLAR W. G., 2002]; [21] [VIRGILI et al., 2009]; [22] [KHODAII et al., 2009]; [23] [BAEK et al., 2010]; [24] [ZAMORA-BARRAZA et al., 2010], entre otros.

Si bien algunos tienen presente la problemática de la adherencia entre capas al introducir materiales geosintéticos, existen pocos desarrollos en este sentido.

La utilización de materiales geosintéticos no se encuentra debidamente difundida en Argentina; los materiales que se comercializan al respecto son en su mayoría importados y recientemente algunos son de origen Nacional. La oferta no es variada y no se realizan controles de calidad del material, existiendo un desconocimiento en el desempeño de esta tecnología por los ingenieros a la hora de la elección del tipo de material a utilizar según las distintas problemática que demanda la obra.

Existen numerosos estudios sobre la aplicación de estos materiales para la recuperación de pavimentos deteriorados. Las principales funciones de ciertos tipos de geosintéticos son la de disipar las tensiones generadas en la punta de la fisura y convertirlas en micro fisuras, retardando su propagación a la superficie [25] [MONTESTRUQUE G., 1996].



El Dr. Guillermo Montestruque presentó, en el Congreso de Vialidad y Tránsito en el 2009, su estudio referido al uso de grillas como sistemas anti-reflejo de fisuras, mediante elementos finitos, utilizando el software NASTRAN (NAsa STRuctural Analysis). En la Figura V.31 se puede observar el comportamiento de una viga sometida a carga de flexión cuando está compuesta con y sin un material geosintético como sistema anti-reflejo de fisura.

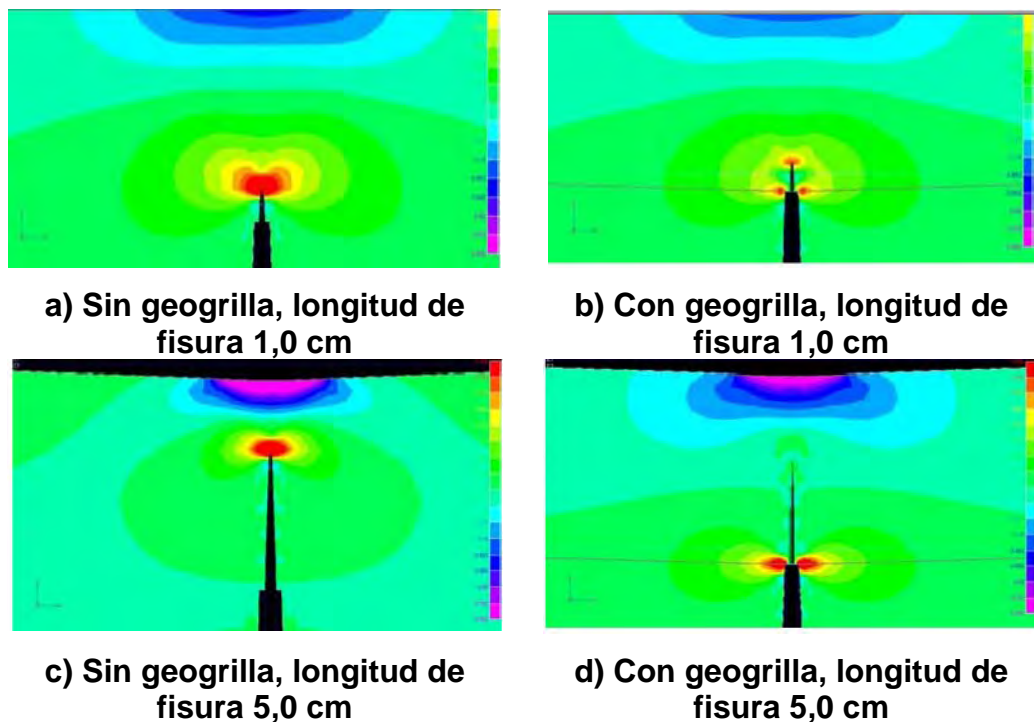


Figura V.31 Propagación de fisura (tensión de tracción en vigas)

Fuente: [26] [PERKINS S. et al., 2010]

Se observa en el estado inicial la extremidad de una fisura, donde la región de máxima tensión de tracción esta representada por el color rojo, Figuras V.31.a y V.31.c. Cuando se introduce un material geosintético la tensión experimenta una reducción debido a que el material toma parte de esa tensión, Figura V.32.b.

En un determinado momento, el nivel de tensión de tracción actuante en la extremidad de la fisura llega a ser suficientemente pequeña, Figura V.31.d. Una vez que el problema del reflejo de fisura es controlado,



la durabilidad de la capa de rodamiento pasa a ser función de las características a fatiga de la propia capa asfáltica.

Debido a los avances del desarrollo tecnológico y los crecientes desafíos de la ingeniería, se cuenta con nuevos materiales que brindan mayor resistencia debido al polímero utilizado en su producción.

La Aramida y el PVA son utilizados con especificaciones técnicas exclusivas (fuera de la línea estándar de producción), en proyectos que justifiquen su uso ya que se trata de polímeros con propiedades mecánicas superiores debido a la posibilidad de fabricar filamentos de mayor tenacidad, alcanzando elevada resistencia a la tracción con niveles de deformación en rotura mucho más bajos [27] [DAL FARRA A. et al., 1995].

Sin embargo, de la amplia gama de materiales disponibles, para que un geosintético introducido entre capas pueda cumplir su función de refuerzo, es imprescindible que:

- Resista los esfuerzos impuestos por el tránsito y por los equipos de construcción de la obra como así también la temperatura de aplicación de la mezcla asfáltica.
- Presente una elevada resistencia a la tracción a fin de absorber las tensiones de tracción del revestimiento asfáltico.
- Posea una perfecta adherencia con las capas de forma que permita la distribución y transferencia de los esfuerzos de tracción.
- Resistencia a la fatiga o sea que absorba los esfuerzos impuestos por las cargas dinámicas del tránsito y la variación de temperatura durante la vida útil del pavimento [28] [RAMOS CELSO R., 2009].

V.6.1 Técnicas de interposición

Independientemente de la posible actuación sobre la capa de refuerzo de mezcla asfáltica o sobre la propia capa de hormigón, se puede actuar en



la interfase a fin de que las juntas o grietas no afecten la capa de refuerzo. Se trata de técnicas de interposición, que pueden considerarse de las siguientes maneras:

V.6.1.1 Localizada

Técnicas que afectan exclusivamente las fisuras o grietas formadas en el pavimento de hormigón conocida como “sellado de fisuras tipo puente o tipo puente y reservorio”. La condición que debe cumplir esta técnica es que no generen una discontinuidad mayor que la propia junta. Algunos materiales se aplican directamente sobre las fisuras dependiendo del estado y problema que las haya originado, no siempre es recomendable esta metodología porque las fisuras no resultan rectilíneas, Figura V.32.



Figura V.32 Sistema de colocación localizado

V.6.1.2 Generalizada

Estas técnicas afectan la interfase en toda su extensión y ancho, como puede ser una capa de estabilizado granular de cierto espesor, mezcla de arena-asfalto o materiales geosintéticos, los cuales vienen teniendo mayor auge por su fácil aplicación y prevención en el reflejo de fisuras en corto plazo sobre la capa de refuerzo, Figura V.33.



Figura V.33 Sistema de colocación generalizado

V.6.2 Sistemas para prevención de fisuras reflejas

Se designa de esta manera a toda configuración de capa que se constituya en una membrana absorbente de los esfuerzos mecánicos que se concentran en las fisuras y grietas de pavimentos existentes deteriorados que se desean rehabilitar [29] [DEMPSEY B. J. et al., 1996].

Se pueden obtener grandes grupos de sistemas para la atenuación de la propagación de fisura refleja:

V.6.2.1 Sellado de fisuras tipo puente

Algunos autores consideran al sellado de fisuras tipo puente como una posible solución ante el reflejo de fisuras pero del tipo S.A.M. (Stress Absorber Membrane).

Más allá de esta apreciación, el correcto tratamiento y sellado de las fisuras existentes beneficia a la solución adoptada, sea cual fuere. Se puede decir que cualquier sistema utilizado debe siempre considerar un adecuado tratamiento de las fisuras [30] [IRRGANG P. E., 2009], Figura V.34.a y Figura 35.

El llenado eficaz de grietas resulta de especial importancia, ya que de no realizarse dicha operación, los materiales geosintéticos no trabajan eficazmente en la prevención y retardo del reflejo de fisuras por posibilitar



el desplazamiento vertical del material, como así tampoco se logra la adherencia buscada ya que se forma un huelgo debajo del mismo, Figura V.34.b y Figura V.34.c. El procedimiento de sellado puede llegar a generar puntos de anclaje con el material, especialmente en las juntas, donde se sellan con materiales afines a los polímeros utilizados en los geosintéticos.

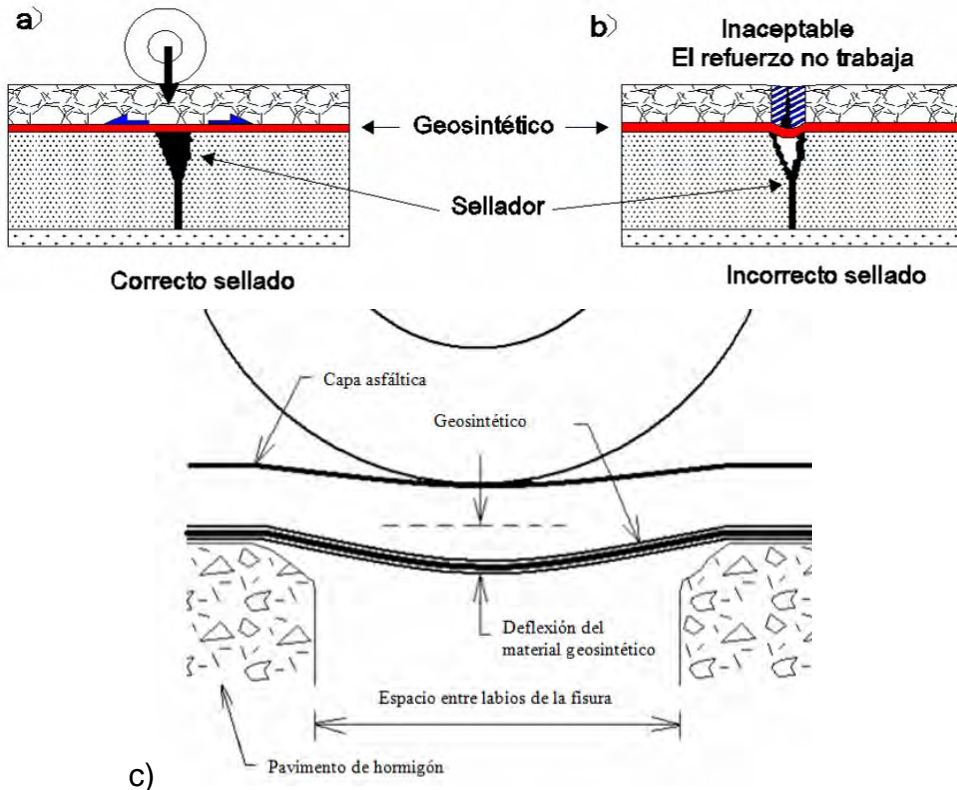


Figura V.34 Cierre de fisuras: a) correcto sellado; b) sellado deficiente: se deforma el material fisurándose la capa superior; c) deflexión del material geosintético

V.6.2.2 Capa de arena-asfalto de 1,5 cm a 2,0 cm de espesor

Este tipo de capa resulta aplicable en superficies fisuradas sin baches o sin hundimientos, en todo su ancho, Figura V.36. Se constituye en una solución de bajo costo utilizada como capa de nivelación previa a la aplicación de ciertos tratamientos anti-reflejo de fisuras [31] [TOTISCARELLI J. et al., 2008].



V.6.2.3 Geotextil No Tejido embebido en asfalto

Es una de las soluciones más extensamente aplicadas para contrarrestar el fenómeno de reflexión de fisuras utilizando geosintéticos. Actualmente esta técnica sigue siendo utilizada; resulta ser una buena opción e impermeabiliza el paquete estructural [32] [FIORIN M., 2009]. Figura V.37.

V.6.2.4 Geocompuesto tipo sandwich de Geotextil Tejido y membrana de asfalto modificado

Este tipo de solución combina las propiedades viscoelásticas de asfaltos modificados con la resistencia a las tensiones de tracción que pueden brindar los geotextiles tejidos, Figura V.38. El geocompuesto es un material prefabricado de fácil instalación y la utilización de geotextiles tejidos brinda características resistentes (resistencia a la tracción) que superan en gran medida a los geotextiles no tejidos, dependiendo de la fibra utilizada. [33] [UTN-FRLP y FAMEIM S.A., 2010].

V.6.2.5 Una capa de slurry-fibra

Está formada por dos capas de lechada asfáltica con una dotación de 6 a 7 kg/m² y un espesor de 8 mm. Se utiliza ligante modificado y se le incorpora fibra sintética de 1,5 cm de longitud, Figura V.39.

V.6.2.6 Capa mono granular

Consiste en una capa, de agregado uniforme de bajo espesor distribuido sobre un riego de liga, con la prevención de no dejar espacios sin recubrimiento del agregado; luego se realiza un barrido o soplado para eliminar el material suelto, se pasa el rodillo y se ejecuta un segundo riego de liga. Se deja cortar el riego, luego se coloca y compacta la capa de rodamiento [34] [VALLEJOS H., 2006], Figura V.40.



V.6.2.7 Geomallas, grillas o geogrillas

Por su alta resistencia a tracción y temperatura, las geogrillas son apropiadas para coser las fisuras; la apertura existente entre los distintos elementos de algunas grillas permite el contacto íntimo entre la superficie de pavimento antiguo y la nueva capa de rodamiento, con lo cual se mejora la solidaridad resistente entre las capas [35] [BUHLER A., 2007], Figura V.41.

V.6.2.8 Malla de acero

Existen pocas experiencias que incorporan mallas de acero para absorber las tensiones que se generan en un pavimento fisurado.

El principal problema que puede llegar a tener esta solución es la dificultad de transporte y colocación de las mallas como así también su durabilidad ante la presencia de humedad [35] [BUHLER A., 2007], Figura V.42.

V.6.2.9 Grilla en fibra de vidrio cubierta con polímero elastomérico

El sistema se basa en impedir elevadas deformaciones, a través de su alto módulo de rigidez. Algunos autores afirman que este tipo de material no es resistente a los ciclos de fatiga (cargas debidas al tránsito y clima) a los que está sometido el pavimento.



Figura V.35 Sellado de fisuras

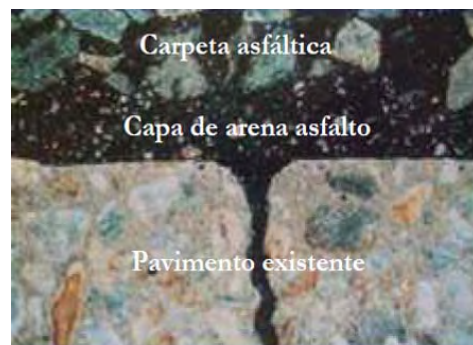


Figura V.36 Capa arena-asfalto



Figura V.37 Geotextil embebido en asfalto



Figura V.38 Geocompuesto



Figura V.39 Slurry-fibra



Figura V.40 Carpeta mono granular



Figura V.41 Grillas o geogrillas



Figura V.42 Malla de acero

De todos estos sistemas y materiales, algunos pueden llegar a aportar resistencia a la capa de refuerzo. No hay trabajos desarrollados respecto a la capacidad que los mismos pueden llegar a ofrecer; en general, se limitan a determinar un coeficiente de efectividad pero algunos afirman que la utilización de éstos puede reducir el espesor del refuerzo asfáltico.



V.6.3 Aplicación de geosintéticos; proceso constructivo

Las etapas constructivas, para la correcta aplicación de los geosintéticos en tareas de mantenimiento y restauración, se sintetiza en varias etapas [36] [PAVCO S. A., 2008], Figura V.43:

1. Limpieza del pavimento deteriorado.
2. Sellado de fisuras, ejecución de la reparación de baches y relleno de fisuras.
3. Aplicación de riego de liga, según el material o sistema a utilizar; antes de extender el geosintético debe asegurándose de que el riego sobrepase en ancho del geosintético.
4. Extensión del geosintético u otro material intermediario. En pavimentos muy deteriorados debe realizarse una capa de nivelación. El geosintético puede extenderse manualmente o mediante máquinas Figura V.44 y Figura V.45, contemplando lo siguientes:
 - Cuando se utiliza riego asfáltico puro como ligante, puede extenderse inmediatamente después de aplicado.
 - Cuando se utilizan emulsiones asfálticas, no puede extenderse hasta que la emulsión haya efectuado su rotura.
 - Debe evitarse la formación de arrugas.
 - Los extremos longitudinales y transversales deben solaparse de 10 a 15 cm.
 - Si se deposita agua de lluvia en la superficie, debe dejarse evaporar antes de aplicar una capa superior.
5. Aplicación de riego de liga (si corresponde según el material) y colocación de mezcla asfáltica en caliente.
6. Compactación de la mezcla asfáltica.

La superficie de mezcla puede aplicarse inmediatamente después de la extensión del geosintético, teniendo en cuenta la una temperatura tal que no dañe el geosintético.

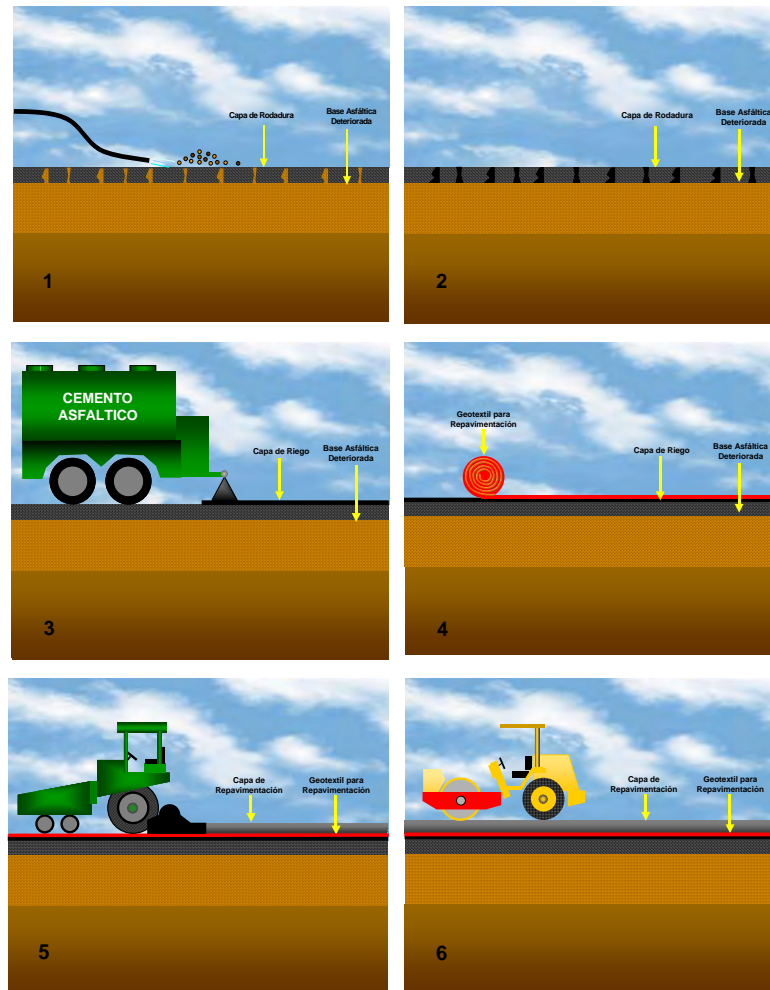


Figura V.43 Etapas constructivas para la aplicación de los geosintéticos

La experiencia demuestra que la extensión manual debe limitarse para obras de pequeña envergadura mientras que los métodos de extensión mecanizados reducen la formación de arrugas en el geosintético, Figura V.44 y Figura V.45.



Figura V.44 Extensión manual



Figura V.45 Extensión mecánica



Figura V.46 Colocación defectuosa

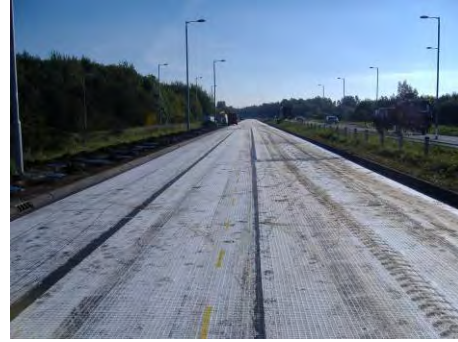


Figura V.47 Colocación exitosa

V.6.4 Geotextiles no tejidos embebidos en la restauración de pavimentos

Los geotextiles no tejidos embebidos en asfalto son los materiales pioneros, dentro de la gama de geosintéticos, en la restauración de pavimentos. Ellos cumplen dos funciones básicas para poder suministrar sus beneficios [37] [PAVCO S. A., 2009]:

- *Barrera impermeabilizadora*: el geotextil alberga una cantidad determinada de cemento asfáltico hasta lograr su saturación, además de una cantidad adicional para permitir su adhesión a la capa sobre la cual se coloca.
- *Membrana amortiguadora de esfuerzos*: el instalar el geotextil entre capas ayuda a absorber parte de los esfuerzos, permitiendo movimientos leves.

La cantidad de ligante a utilizar es uno de los parámetros donde se debe tener mayor cuidado. Una de las normas constructivas internacionales para repavimentación (Task Force 5, compuesta por la AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, la AGC, Associated General Contractors y la ARTBA American Road & Transportation Builders Association) exige que como mínimo la cantidad



de cemento asfáltico para saturar el geotextil debe ser de $0,9 \text{ l/m}^2$, dependiendo del gramaje del material.

Una cantidad insuficiente de ligante causa que el material no se sature totalmente, perdiéndose el efecto de impermeabilidad o puede que la adhesión entre el geotextil y las capas no sea suficiente. Una cantidad excesiva de ligante originará una superficie potencial de falla por deslizamiento, al igual que el problema de la exudación del ligante.

La literatura presenta resultados positivos en la reflexión de fisuras sobre asfalto, cuando se han utilizado geosintéticos impregnados [19] [LYTTON R. L., 1989]; [38] [CLEVELAND et al., 2002]; [39] [PRIETO et al., 2007]; [40] [PENMAN y HOOK, 2008]. Por otro lado, algunas de las aplicaciones muestran poco o incluso un rendimiento negativo en retardar la reflexión de fisuras debido a la falta de concepto del mecanismo del sistema de capa intermedia y/o como resultado de una instalación inadecuada de la capa intermedia [41] [AI-QADI et al., 2009]; [42] [CHOWDHURY et al., 2009].

Otro autor [43] [PEREIRA, 2002] presenta algunas ventajas y desventajas de la utilización del geotextil como sistema anti-fisuras de reflexión. La desventaja principal es el deslizamiento de la manta, que es generada por problemas constructivos (tasa de rotura y una unión inadecuada de la emulsión) y las zonas de desaceleración, y los cambios de las curvas del camino. Atendiendo a lo citado, se realizaron estudios en cuanto a la capacidad óptima de emulsión asfáltica que un geotextil no tejido GNT PET 150 g puede absorber; se entiende por retención el volumen de emulsión retenido por la estructura del material geosintético por unidad de área de la probeta después de su inmersión.

Los ensayos se realizan para dos temperaturas de la emulsión asfáltica, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sobre el material GNT PET 150 g, siguiendo los lineamientos de la Norma IRAM 78027 en correspondencia con la Norma ASTM D 6140/00, Tabla V.9.



Tabla V.9 Retención óptima de emulsión por el material GNT PET 150 g

Tipo de ligante	Retención óptima a 20 °C (l/m ²)	Retención óptima a 60 °C (l/m ²)
ECRR-M	0,93	2,46

Luego de ser embebido el material se procede a realizar ensayos de tracción por banda ancha bajo la Norma IRAM 78012. Comparativamente se realizan los ensayos de tracción sobre el material virgen, Tabla V.10.

Tabla V.10 Resultado a tracción sobre material GNT PET 150 g.

Tipo de ligante	Sentido paralelo		Sentido perpendicular	
	Carga (KN/m)	Deformación (mm)	Carga (KN/m)	Deformación (mm)
Sin ligante	6,21	63,76	6,37	52,43
ECRR-M (20 °C)	8,51	115,7	7,47	112,0
ECRR-M (60 °C)	11,98	93,76	9,84	93,42

Aumenta la carga y la deformación cuando el material es saturado con emulsión asfáltica modificada; esto resulta más evidente a mayor aplicación de la temperatura de la emulsión.

Se realiza la observación a través de lupa del material virgen y luego de ser embebido donde se evidencia la modificación de la orientación de las fibras, Figura V.48 a Figura V.50.



Figura V.48 Muestra virgen



Figura V.49 Muestra embebida

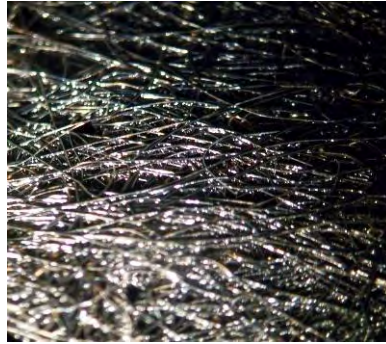


Figura V.50 Muestra embebida luego de ser sometida a tracción

Se observa la manera en que éstas colapsaban. Se observa en la Figura 52 que la rotura del material luego de ser embebido, es de forma frágil.



Figura V.51 Material virgen



Figura V.52 Material embebido

V.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GEOSINTÉTICOS

Los materiales propuestos para el desarrollo de la investigación, de diferente conformación y composición polimérica, se caracterizan bajo normativa IRAM.

V.7.1 Masa por unidad de área, [44] [IRAM 78002/97]:

Procedimiento: se miden las probetas con una precisión del 0,5 %. El área es de 100 cm².



Expresión de los resultados: se calcula la masa por unidad de área, μ_A .

$$\mu_A = \frac{m \cdot 10000}{A}$$

siendo:

μ_A : masa por unidad de área, en gramos por metro cuadrado

m: masa de la probeta, en gramos

A: área de la probeta, en centímetros cuadrados

Se calcula la media aritmética de la masa por unidad de superficie, redondeando el resultado al 1 g/m² más próximo, y el coeficiente de variación, en porcentaje. En la Tabla V.11 se presentan los valores de masa por unidad de área de los diferentes geosintéticos. El ensayo se efectúa sobre un total de diez probetas, Figura V.53.

Tabla V.11 Masa por unidad de área

MATERIAL	μ_A (g/m ²)	Coefficiente de variación (%)
FM PP	1795	7
Geotextil No Tejido en PP	190	3
RBK PET	1663	2
HSK PVA	277	1
HSK PET	332	2
MAC PET	232	3
GR FV	546	0
GNT PET 150 g	152	7
Membrana + HSK PET	1937	5
FM PP arena	2430	6

El material MAC PET, de similares características y composición química que el material HSK PET, presenta menor masa por unidad de área. Esto es importante por el geotextil no tejido en polipropileno que posee de base, el cual resulta más degradable a la temperatura de exposición.

**Figura V.53 Ensayo de distintos materiales geosintéticos****V.7.2 Espesor a presiones prefijadas, [45] [IRAM 78004-1:2001]:**

Procedimiento: Se determina el espesor de las probetas a presiones de 2 kPa, 20 kPa y 200 kPa con una precisión del 1%. Se utiliza un pie de presión con superficie circular, lisa y plana de 25 cm² de área, el cual apoya en una placa de referencia perfectamente plana. El equipamiento se completa con dos flexímetros (comparadores de longitud) capaces de registrar los espesores con gran precisión. El ensayo se efectúa sobre un total de diez probetas, Figura V.55 y Figura V.55.

En la Tabla V.12 se presentan los valores del espesor, a presiones prefijadas, para los diferentes geosintéticos.

Tabla V.12 Espesor a presiones prefijadas (presión 20 kPa)

MATERIAL	Espesor (mm)	Coefficiente de variación (%)
FM PP	1,72	5
Geotextil No Tejido en PP	0,47	11
RBK PET	1,70	2
HSK PVA	1,40	16
HSK PET	1,50	7
MAC PET	2,10	3
GR FV	1,10	2
GNT PET 150 g	0,87	8
Membrana + HSK PET	1,88	12
FM PP arena	2,60	0

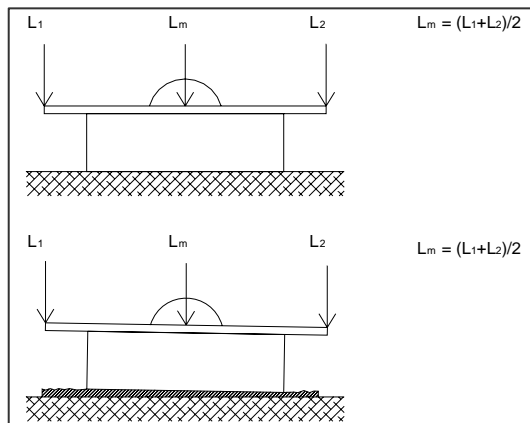


Figura V.54 Registro de lecturas



Figura V.55 Equipo de ensayo



Figura V.56 Ensayo de algunos materiales

V.8.3 Ensayo de tracción con probetas anchas, [46] [IRAM 78012/01]:

Procedimiento: se mantiene sujeta la probeta de ensayo en las mordazas de una máquina de ensayo de tracción que se desplaza a una velocidad determinada, mientras aplica una fuerza longitudinal a la probeta de ensayo hasta que ésta rompe.

En este método, el ancho es mayor que el largo de la probeta, ya que algunos materiales tienen tendencia a encogerse (curvarse), bajo carga, en el largo de la probeta. El mayor ancho reduce el efecto de encogimiento de tales tejidos y proporcionan una relación más próxima al comportamiento esperado del tejido sobre el terreno.

Para el ensayo se toman probetas de 200 mm de ancho y un largo tal que permita 100 mm entre los bordes de las mordazas. De acuerdo a la norma



deben tomar 5 elementos de tracción (filamentos) en el ancho de la probeta.

Expresión de los resultados: se calcula la resistencia a la tracción σ_f , expresada en kN por metro, directamente de los datos obtenidos de la máquina de ensayo de tracción, utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = F_f C$$

donde:

σ_f es la resistencia a la tracción, en kN por metro;

F_f es la carga máxima registrada, en kN;

C se obtiene de la ecuación correspondiente, según el material ensayado), en m^{-1} .

Para no-tejidos, tejidos o materiales similares, $C = 1/B$, donde B es el ancho nominal de la probeta, en metros. Para los materiales FM PP, FM PP arena y RBK PET resulta $C = 1/0,2 = 5$.

Para geogrillas $C = N_m/N_s$, donde N_m es el número mínimo de elementos a tracción dentro de 1 metro de ancho del material ensayado y N_s es el número de elementos de tracción dentro de la probeta de ensayo.

Para los materiales HSK PET, HSK PVA y MAC PET con abertura de malla de 40x40 mm, resulta $N_m = 1,00/0,04 = 25$. De la misma manera, para un ancho de probeta de 200 mm según la norma, se tiene que $N_s = 200/40 = 5$. Entonces $C = 25/5 = 5$ (válido para ambas direcciones).

Para el material GR FV con abertura de malla de 20x20 mm, resulta $N_m = 1,00/0,02 = 50$. De la misma manera, para un ancho de probeta de 200 mm según la presente norma, se tiene que $N_s = 200/20 = 10$. Entonces $C = 50/10 = 5$ (válido para ambas direcciones).



Descripción general de las condiciones de ensayo: Se ensayan 5 probetas en estado seco a una velocidad de 20 mm/min por cada dirección. Las mordazas son de cierre mecánico de superficie lisa, Tabla V.13.

Tabla V.13 Ensayo a tracción de los materiales geosintéticos

Material	Sentido paralelo al rollo		Sentido perpendicular al rollo	
	σf (kN/m)	Deformación a carga máxima (mm)	σf (kN/m)	Deformación a carga máxima (mm)
FM PP	28,04	21,04	28,31	22,11
Geotextil tejido PP	22,68	19,17	22,25	26,09
RBK PET	15,30	50,16	15,49	53,22
HSK PET	41,43	17,25	37,28	15,13
HSK PVA	39,92	8,24	30,67	5,59
MAC PET	31,79	19,27	25,25	15,90
GR FV	44,58	2,52	36,64	2,64
GNT PET 150 g	6,21	63,76	6,37	52,43
FM PP arena	34,93	26,88	32,00	23,55

Tracción de los materiales geosintéticos

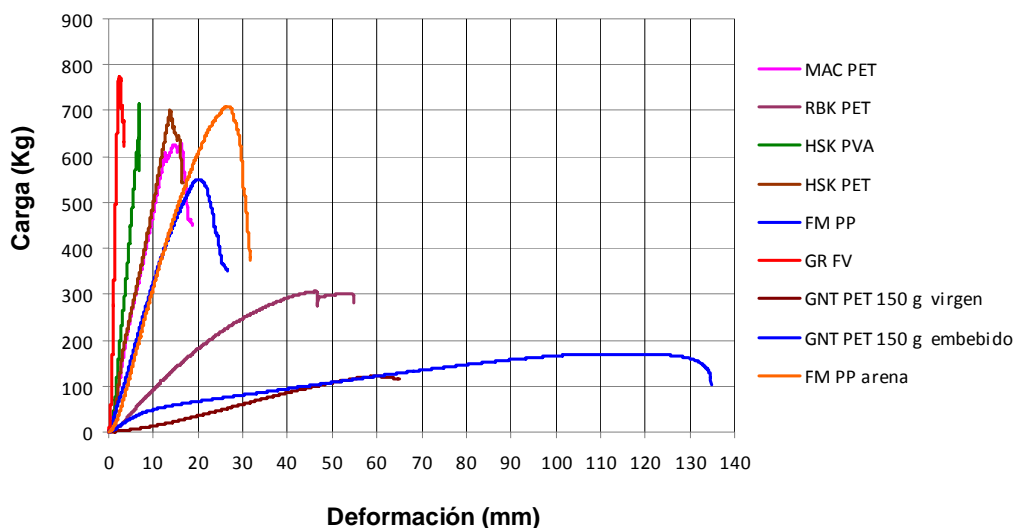


Figura V.57 Carga vs. deformación para los diferentes materiales

Nota: Las curvas son promedio de 5 determinaciones



Las curvas carga/deformación de distintos materiales presentan comportamiento marcadamente diferentes. Los materiales GR FV y HSK PVA presentan una curva típica de un material rígido y frágil, tomando gran carga a baja deformación donde la rotura se produce en forma repentina con poca o ninguna deformación plástica. Los materiales HSK PET, MAC PET, FM PP y FM PP arena son materiales fuertes y resistentes, tomando elevada carga a deformaciones mayores que los anteriores; se extienden poco y rompen pronto.

El material RBK PET presenta un comportamiento dúctil, donde las fibras se van alineando en la dirección de la carga produciéndose una deformación permanente hasta su rotura repentina. Es un material deformable con poca región elástica.

El material GNT PET 150 g tanto virgen como embebido, presenta alta deformación con poca absorción de carga. Para el caso del material embebido en emulsión asfáltica modificada con polímero SBS, el material se rigidiza, reorientando la distribución de las fibras tomando mayor carga a mayor deformación que el material virgen.

Se representa el resultado final a través de los valores de módulo secante para diferentes deformaciones unitarias previamente establecidas. El módulo secante correspondiente a una deformación específica (c), en porcentaje, se encuentra esquematizado en la Figura V.58.

El módulo secante define la rigidez del material y se expresa en kN/m. Para su cálculo la norma considera valores de tracción a las deformaciones del 2, 5 y 10% para cada muestra y en cada dirección.

La siguiente ecuación se emplea para su determinación:

$$J_{sec} = (F \times C \times 100) / \epsilon$$

donde:



F es la carga determinada a la deformación ϵ en kN,
 ϵ es la deformación especificada, en porcentaje,
C se obtiene de la ecuación correspondiente, según el material
ensayado, en m^{-1} .

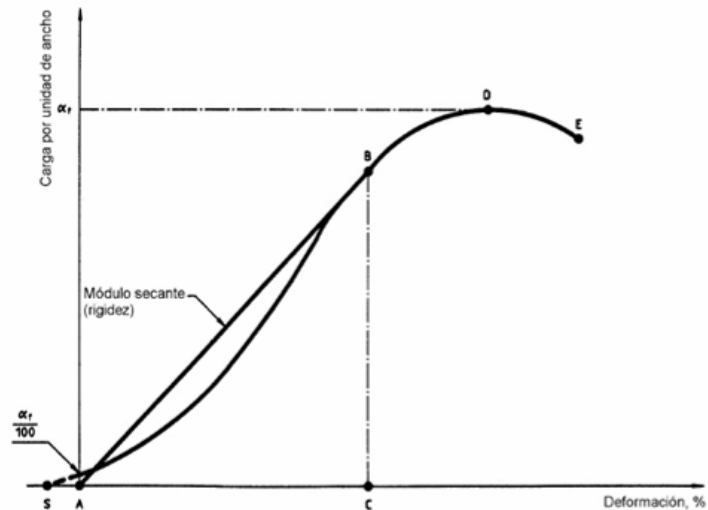


Figura V.58 Curva típica carga vs. Deformación
Fuente: IRAM 78012



Figura V.59 Ensayo sobre algunos materiales

Se considera el J_{sec} para la dirección paralela al rollo, tomándose el promedio. La Tabla V.14 brinda los valores finales obtenidos en el ensayo.



Tabla V.14 Módulo secante (rigidez) de los materiales geosintéticos

Dirección de ensayo		Paralela al rollo		Perpendicular al rollo	
Material	Deformación (%)	Carga promedio (kN)	Jsec (kN/m)	Carga promedio (kN)	Jsec (kN/m)
FM PP	2	0,53		0,51	
	5	1,33	133,49	1,28	128,00
	10	2,67		2,56	
GNT FM PP	2	0,47		0,35	
	5	1,19	118,72	0,86	86,25
	10	2,37		1,73	
RBK PET	2	0,12		0,12	
	5	0,31	30,82	0,29	29,33
	10	0,62		0,59	
HSK PET	2	1,00		0,97	
	5	2,49	248,89	2,43	243,06
	10	4,98		4,86	
HSK PVA	2	1,94		2,21	
	5	4,86	485,63	5,53	552,73
	10	9,71		11,05	
MAC PET	2	0,66		0,63	
	5	1,65	164,52	1,59	156,72
	10	3,29		3,17	
GR FV	2	7,01		5,67	
	5	17,52	1752,02	14,17	1416,74
	10	35,04		28,35	
GNT PET 150 g virgen	2	0,04		0,04	
	5	0,10	9,99	0,10	10,03
	10	0,20		0,20	
GNT PET 150 g embebido	2	0,04		0,04	
	5	0,10	10,10	0,10	10,04
	10	0,20		0,20	
FM PP arena	2	0,54		0,52	
	5	1,36	136,05	1,30	129,90
	10	2,72		2,60	



V.7.4 Ensayo por Espectroscopía Electrónica de Barrido

Se visualizan las diferentes grillas poliméricas con objeto de analizar su estado superficial. Se evidencian diferentes conformaciones de los materiales con deficiencia en su recubrimiento bituminoso.

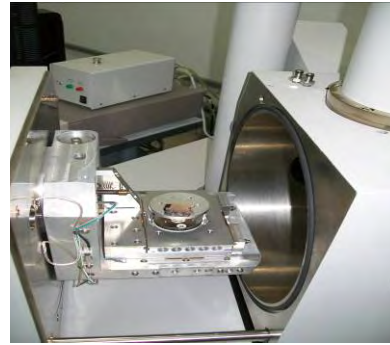


Figura V.60 Equipo utilizado para la obtención de imágenes por SEM

Se utiliza el equipo SEM FEI QUANTA 200 disponible en la UNLP, Figura V.61, para observar las fibras componentes de los distintos materiales geosintéticos. Las Figuras V.61 a V.64 presentan las imágenes obtenidas de las muestras.

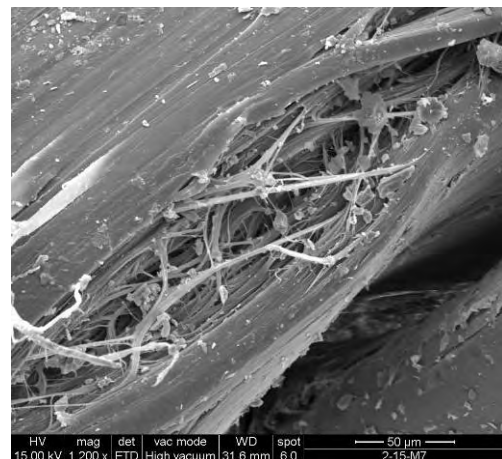
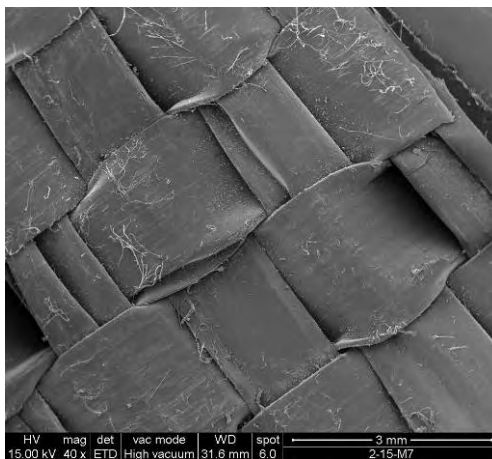


Figura V.61 Imágenes obtenidas para el material FM PP

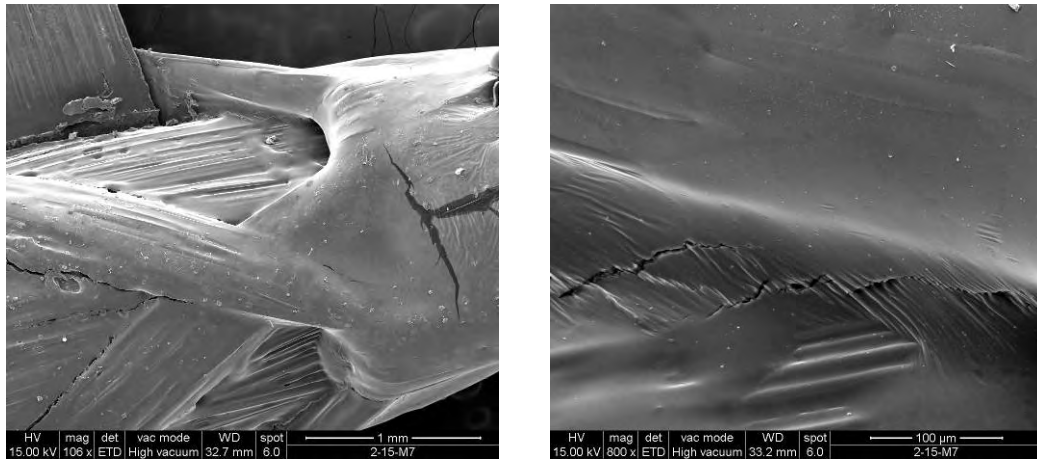


Figura V.62 Imágenes obtenidas para el material GR FV

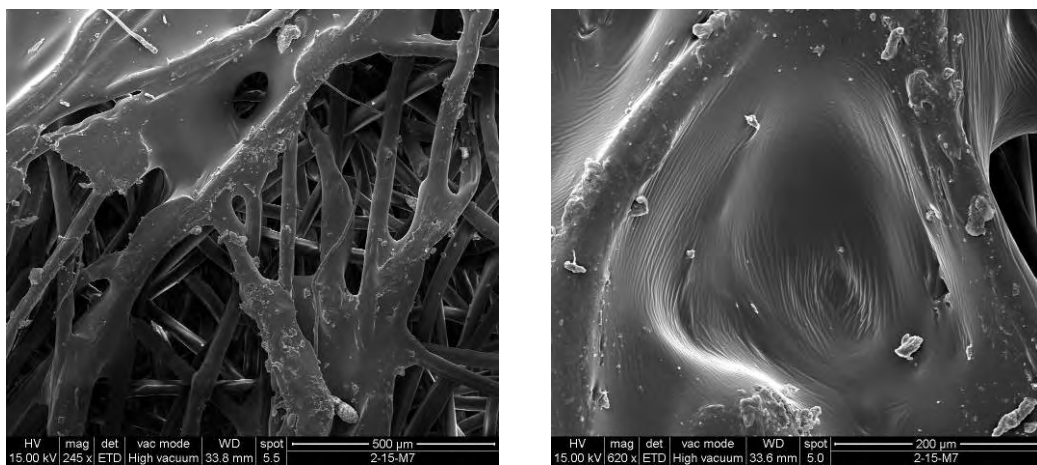


Figura V.63 Imágenes obtenidas para el material RBK PET

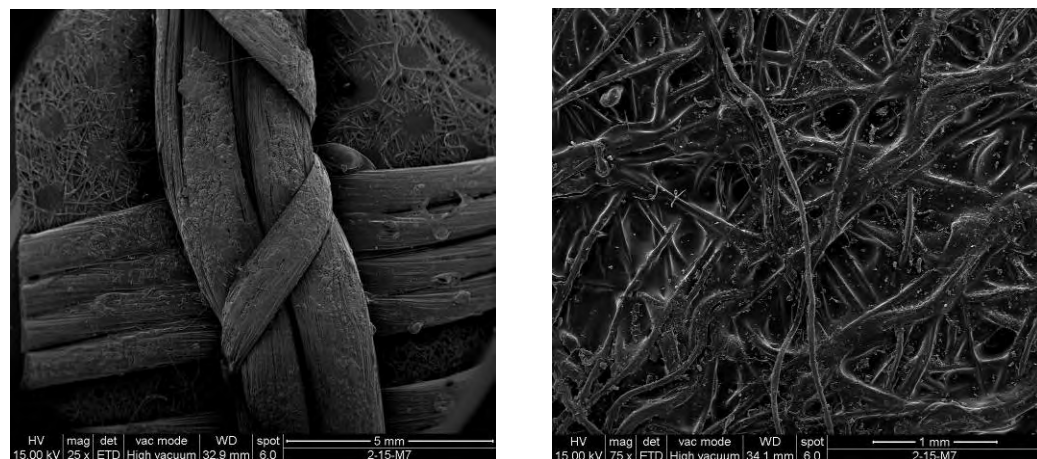


Figura V.64 Imágenes obtenidas para los materiales HSK PET y PVA

Se evidencian diferentes conformaciones de los materiales con deficiencia en su recubrimiento bituminoso en algunos casos. Los materiales HSK PVA, HSK PET y MAC PET poseen una costura entre nudos (Figura V.64)



mientras que la fibra de vidrio (GR FV) muestra un nudo conformado, Figura V.62.

V.7.5 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

El ensayo se realiza con objeto de identificar y analizar la composición de las grillas poliméricas.

Esta técnica resulta apropiada para identificar polímeros sintéticos [47] [BRAUN D., 1999]. La técnica se fundamenta en que la energía radiante asociada a la radiación IR es capaz de provocar vibraciones de los enlaces moleculares. Dependiendo de los átomos implicados en estas uniones y del tipo de unión, la absorción de radiación se produce a determinados valores de frecuencia o número de onda.

Por lo tanto las bandas del espectro FTIR obtenido son características de determinados grupos funcionales y su estudio permite identificar la especie química de que se trata [48] [HESSE et al., 1995].

Los espectros IR son obtenidos mediante el equipo PERKIN ELMER Universal ATR Sampling Accesory, Figura V.65, con una resolución de 4 cm^{-1} registrándose en método observancia.

El análisis de los datos se realiza mediante el software SPECTRUM v5.0.1 en todos los casos; la caracterización analítica de los materiales utilizados en la tesis se realiza a partir de la asignación de las correspondientes bandas a determinados grupos químicos a través de la búsqueda de bandas características en libros de referencia para identificar correctamente el material [49] [CONLEY ROBERT T., 1979].



Figura V.65 Equipo utilizado para la determinación de los espectros FT-IR de las diferentes fibras componentes de los materiales geosintéticos

V.7.5.1 Espectro FTIR para el material HSK PET

Se obtienen los espectros para las diferentes partes componentes del material HSK PET (fibra ancha, fibra angosta), agregándose como comparación el espectro obtenido para la fibra virgen en poliéster, Figura V.66.

Los espectros obtenidos de las fibras componentes del material HSK PET demuestran que, tanto las fibras anchas como angostas que la conforman, corresponden a poliéster como se aprecia en comparación con el espectro azul que corresponde a la fibra virgen en poliéster.

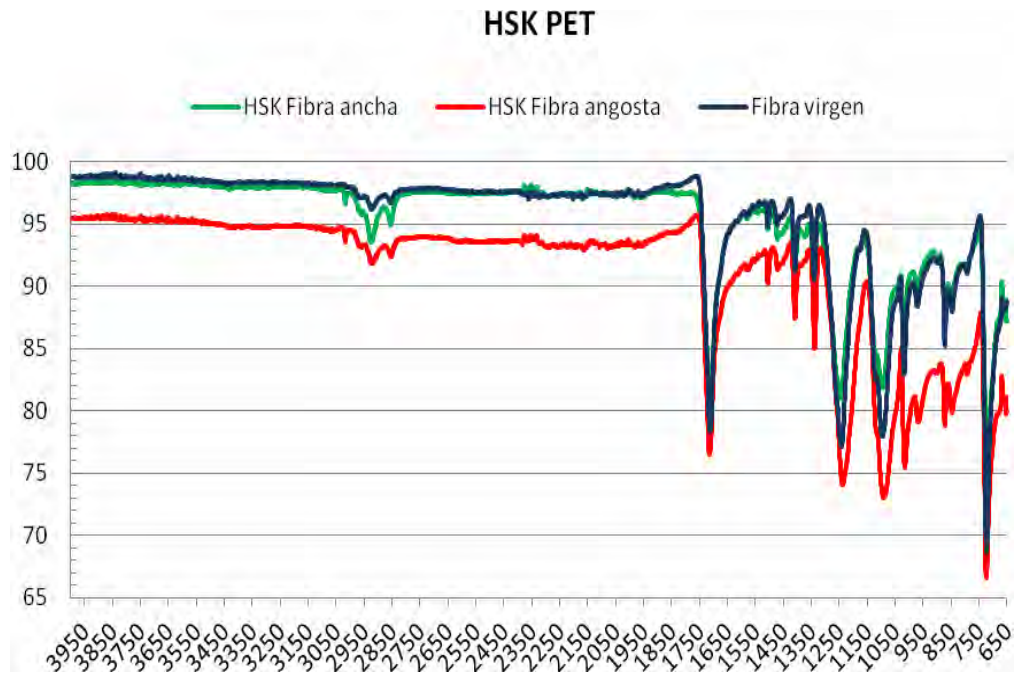


Figura V.66 Espectros infrarrojo del material HSK PET

El espectro presenta a la vibración a los 2900 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} picos más acentuados indicando mayor vibración del grupo C-H. A los 1700 cm^{-1} hacia abajo los enlaces C-C se presentan más fuertes.

V.7.5.2 Espectro FTIR para fibras en polipropileno

Se obtienen los espectros para las fibras en polipropileno que conforman los materiales geosintéticos. El ensayo se realiza sobre el Geotextil No Tejido en polipropileno de fondo (componente de los materiales HSK PET, HSK PVA y MAC PET) y Geotextil Tejido en polipropileno (que conforma el material FM PP y FM PP arena), agregándose como comparación el espectro obtenido para la fibra virgen en polipropileno. Los picos tienen buena correspondencia, siendo más acentuados los picos del material FM PP, Figura V.67.

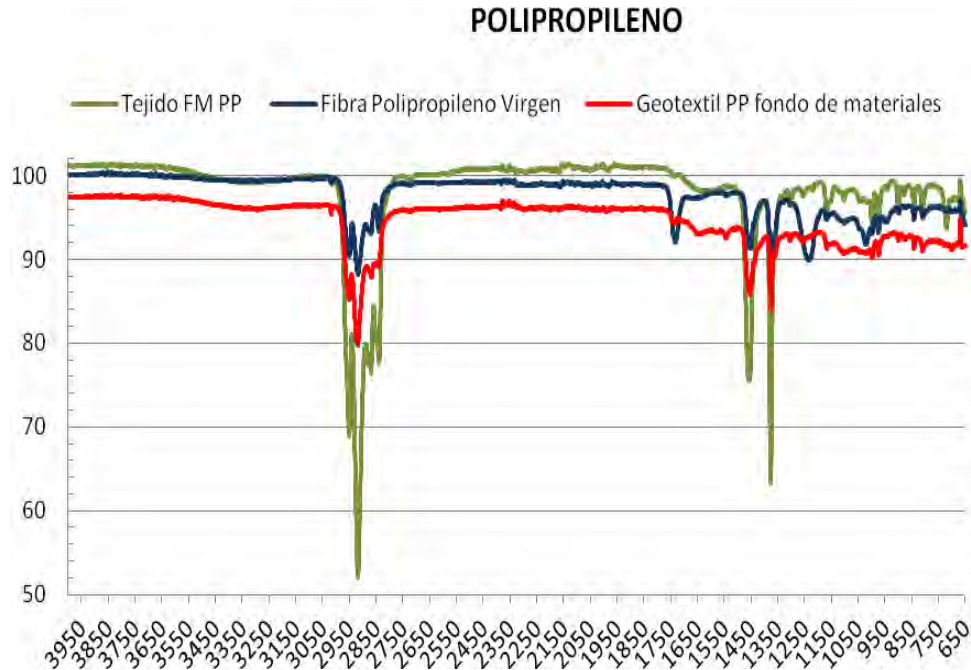


Figura V.67 Espectro IR para fibras en polipropileno

El espectro presenta a los 2950 cm^{-1} grupos C-H (CH_2 y CH_3). A los 2920 cm^{-1} se manifiesta el enlace C-H. A los 1450 cm^{-1} corresponde al enlace C-H nuevamente, mientras que a los 1375 cm^{-1} corresponde al enlace C-C. Entre 1350 cm^{-1} y 650 cm^{-1} las vibraciones no presentan intensidad de importancia.

V.7.5.3 Espectro FTIR para el material HSK PVA

Se obtienen los espectros para los componentes del material HSK PVA; se determina el espectro para la fibra+bitumen de recubrimiento, agregándose como comparación el espectro obtenido para la fibra virgen en polivinil alcohol, Figura V.68.

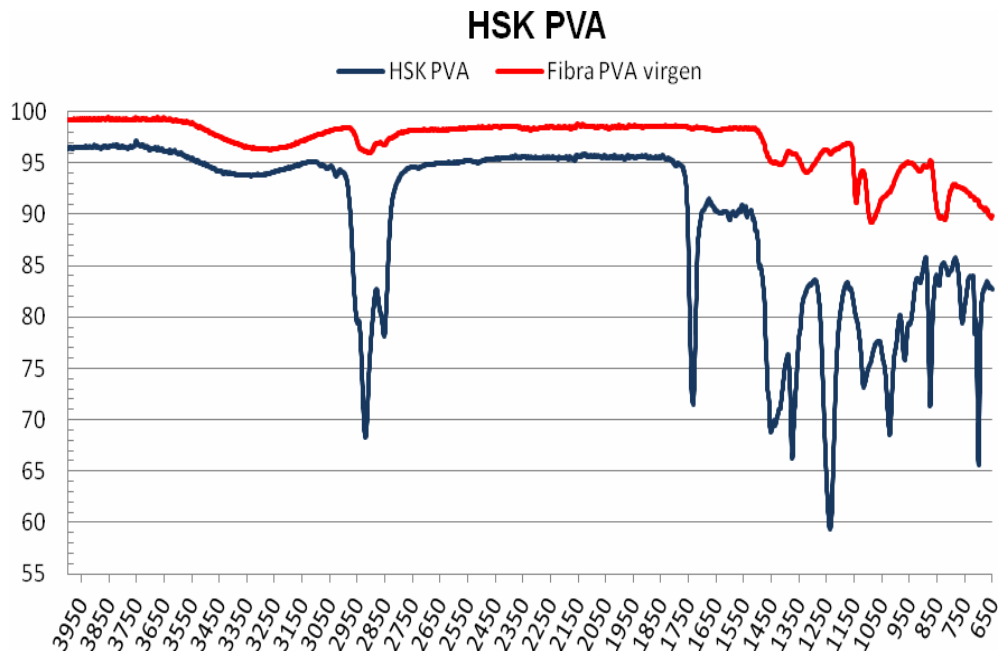


Figura V.68 Espectro IR para fibras en polivinil alcohol

El espectro presenta para el caso del espectro de polivinil alcohol con recubrimiento una banda entre 3450 cm^{-1} y 3150 cm^{-1} correspondiente al grupo O-H. A los 2920 cm^{-1} se manifiesta el grupo C-H (CH_2 y CH). A los 1750 cm^{-1} corresponde al enlace C=O del grupo acetato. Entre los 1450 cm^{-1} y 1350 cm^{-1} corresponde al grupo CH_2 . A los 1250 cm^{-1} corresponde al enlace C-O-C. Entre 1150 cm^{-1} y 650 cm^{-1} corresponde al doble enlace C-H.

Se evidencia en el espectro obtenido para el material HSK PVA los cambios producidos por el recubrimiento sobre la fibra virgen.

V.7.5.4 Espectro FTIR para el material MAC PET

Se obtuvieron los espectros para los componentes del material MAC PET, se determinó el espectro para la fibra+bitumen de recubrimiento, agregándose como comparación el espectro obtenido para la fibra virgen en poliéster, Figura V.69.

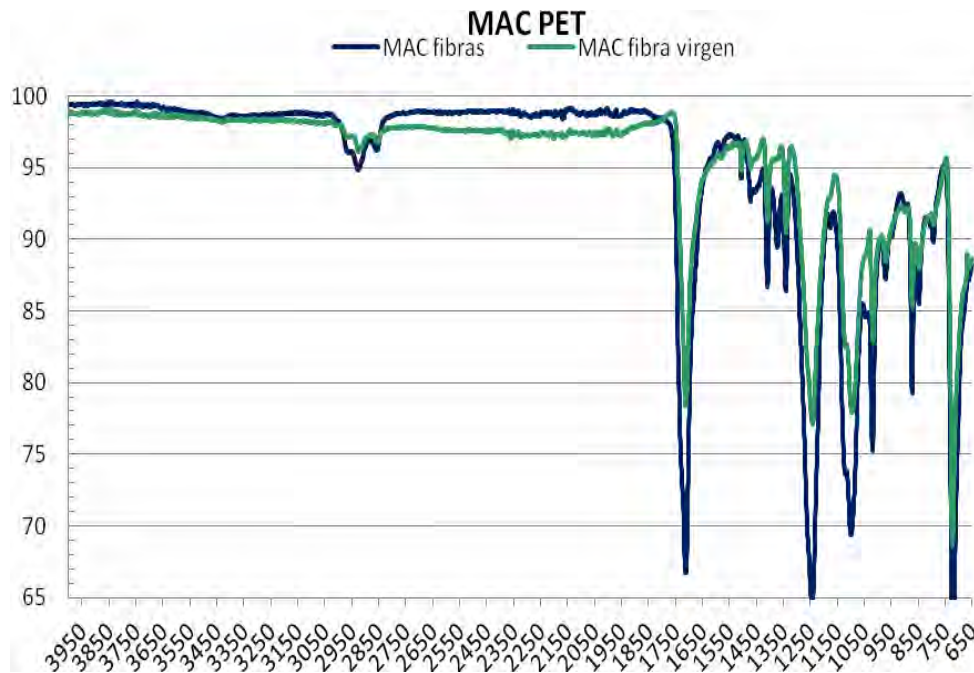


Figura V.69 Espectro IR para el material MAC PET

El espectro presenta a los 2950 cm^{-1} el grupo CH_2 . A los 2850 cm^{-1} se manifiesta el enlace C-H. A los 1750 cm^{-1} corresponde al enlace C=O. A los 1440 cm^{-1} corresponde al enlace C-H mientras que para 1250 cm^{-1} corresponde al enlace C-O. A los 700 se manifiesta en enlace C-H.

El espectro IR obtenido para el material MAC PET, ya sea para la fibra virgen como para la fibra con recubrimiento, no presenta cambios sustanciales.

V.7.6 Caracterización de la membrana base del material FM PP y el material FM PP arena

Las características del asfalto modificado que conforma la base del sistema geotextil tejido–asfalto del material denominado FM PP y FM PP arena se obtienen en base a los ensayos exigidos en la norma IRAM 6596/00 para asfaltos modificados.



De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla V.15, el asfalto que compone la membrana es comparable con un sellador asfáltico SA-50 cuyas exigencias fueron tomadas de la Norma IRAM 6838 “asfalto para uso vial. Selladores asfálticos para juntas, fisuras y grietas de pavimentos”.

Tabla V.15 Características de la membrana asfáltica

Ensayo	Valor	Exigencia SA-50
Punto de ablandamiento Anillo B (°C)	117	Min. 105
Punto de inflamación (°C)	235	Min. 230
Penetración (0,1 mm)	40	35-50
Recuperación elástica por torsión 25 °C (%)	96	Min. 90
Resiliencia (%)	65	Min. 40
Viscosidad dinámica 190 °C (mPas)	221	-



V.8 REFERENCIAS

- [1] UTN LEMaC, INTI-CIT [2003]. Geosintéticos. Desde la fabricación a su aplicación en obra. ISBN 950-42-0043-5, 338 p.
- [2] International Geosynthetics Society (IGS).
<http://geosyntheticssociety.org/>
- [3] Holtz, Robert D.; et al, [1998]. Geosynthetic. Design and Construction Guidelines. Federal Highway Administration FHWA HI-95-038. DTFH61-93-C-00120. 460 p.
- [4] Koerner Robert M. [2005]. Designing with Geosynthetics. fifth edición. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. ISBN 0-13-145415-3. 796 p.
- [5] Romero Vivar G. [2006]. Visión general de los geosintéticos. Informe técnico. Instituto para el Desarrollo de Pavimentos del Perú (IDPP). Municipalidad de Pueblo libre. Lima, Perú.
- [6] Maccaferri S. A. [2012]. Introducción a los geosintéticos. Soluciones ambientales Maccaferri S. A.
<http://es.scribd.com/doc/105153405/Obras-con-Geosinteticos>
- [7] Botasso Hugo G. [2007]. Inclusión de caucho reciclado en mezclas asfálticas. Tesis Magister en Ingeniería Ambiental. UTN-FRLP. 221 p., Argentina.
- [8] Rodríguez, Silvia; Sanz, Francisco; Aragonés, José Emilio [1996]. Las fibras textiles. Tecnología Industrial I (1ª edición). Tema 13. pp. 197-199. ISBN 84-481-0444-7. Madrid, España.
- [9] Gonzáles Lobo, L. [2011]. Desarrollo de nuevas tecnologías en textiles. Textiles y materiales para el diseño en el siglo XXI. pp.1-62



- [10] Hollen, Norma; Saddler, Jane; Langford, Anna [1997]. Introducción a los textiles. ISBN 9789681818982 Editorial LIMUSA. 359 p., España.
- [11] Fernández Calvo, C. [2006]. Estudio experimental de refuerzo de suelos con fibras sintéticas. Geogaceta 40, ISSN: 0213683X. pp. 303-306. España.
- [12] Contreras Normabuena, Juan; Zamora Barraza, David; Castro Fresno, Daniel; Vega Zamanillo, Ángela. [2009]. Análisis térmico de geosintéticos utilizados en la rehabilitación de pavimentos. Revista chilena de ingeniería. Vol. 17, N°1, pp. 95-100. Chile.
- [13] Billmeyer Frd W. JR [2004]. Texts Book of polymer Science. ISBN: 84-291-7048-0. Editorial Reverté. 581 p.
- [14] Al-Qadi, Imad L.; Morian, Dennis A.; Stoffels, Shelley M.; Elseifi, Mostafa; Chehab, Ghassan; Stark, Timothy [2008]. Synthesis on Use of Geosynthetics in Pavements and Development of a Roadmap to Geosynthetically-Modified Pavements. The Federal Highway Administration (FHWA). United States.
- [15] Vanden Eunde S. et al, [2000]. Thermal behaviour of homogeneous ethylene-1-octene copolímero and linear polyethylene at high pressures. Polymer. Vol. 41 N°9, pp. 3411-3423. Hervelee, Belgium.
- [16] Norma ASTM D 1525 [2009]. Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics.
- [17] Shackelford James F. [2005]. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Sexta edición. ISBN: 84-205-4451-5. 873 p. Editorial PEARSON Prentice Hall.



- [18] Jayawickrama P. W.; Lytton R. L. [1987]. Methodology for Predicting Asphalt Concrete Overlay Life Against Reflective Cracking. Proceedings of the 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, Vol. 1, pp. 912-924.
- [19] Lytton R. L. [1989]. Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete Geotextiles and Geomembranes, Vol. 8, pp. 217-237.
- [20] Kim J. y Butllar W. G. [2002]. Analysis of reflective crack control system involving reinforcing grid over base-isolating interlayer mixture Journal of Transportation Engineering, Vol. 128, pp. 375-384.
- [21] Virgili A.; Canestrari F.; Grilli A.; Santagata F. A. [2009]. Repeated load test on bituminous systems reinforced with geosynthetics Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27, pp. 187-195.
- [22] Khodaii A.; Fallah S.; FM Nejad [2009]. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27, pp. 1-8.
- [23] Baek J.; Al-Qadi I. L.; Butllar W. G. [2010]. Effect of Field Condition Parameters on the Performance of Geosynthetic Based Interlayer Systems Used to Control Reflective Cracking in Hot-Mix Asphalt Overlays. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1473-1476.
- [24] Zamora-Barraza D.; et al, [2010]. New procedure for measuring adherence between a geosynthetic material and a bituminous mixture. Geotextiles and Geomembranes.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.12.010>



- [25] Montestruque Vilchez G. [1996]. Estudos de sistemas anti-reflexão de trincas na restauração de pavimentos asfálticos. Tese Mestrado em Ciências de InfraEstrutura de Transporte – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. Brasil.
- [26] Perkins Steven W.; et al, [2010]. Geosynthetic in pavement reinforcement application. 9th International Conference on Geosynthetic. Brasil.
- [27] Rodríguez, Carlos; Dal Farra, Alberto; [1995]. Geotextiles en repavimentación asfáltica, balance y perspectivas actuales de su aplicación en la republica argentina. CORIPA S.A. pp. 1-19.
- [28] Ramos Celso R. [2009]. Estudo e emprego de grelha polimérica anti-reflexão de trincas em pavimentos flexíveis. XV Congreso Iberoamericano del asfalto. Lisboa, Portugal.
- [29] Dempsey Barry J.; et al., [1996]. Stress Absorbing Composite for Road Repair and Method. United State Patent N° 5.513.925. University of Illionis.
- [30] Irrgang, Patricia E. [2009]. Sellado de juntas y grietas, correcta aplicación y evolución en Latinoamérica. XV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. Lisboa, Portugal.
- [31] Totiscarelli, Jorge; Noste, Mario; Cainelli; Diana [2008]. Membrana anti-fisura de arena asfalto en repavimentaciones. Comportamiento estructural. XXXV Reunión del asfalto (CPA). Rosario, Argentina.
- [32] Fiorin Menezes, Marcelo [2009]. Avaliação de desempenho de recapeamentos asfálticos com camada intermediaria de geotextil submetidos a solicitação por simulador de trafico. Porgrado de la Universidad de Rio Grande Do Sul. Porto Alegre. Brasil.



- [33] Universidad Tecnológica Nacional, FRLP y FAMEIM S. A. [2010]. Evaluación de Polyfill SRV (geocompuesto) como Sistema de Membrana Anti-fisura S.A.M.I. Acuerdo de transferencia e innovación tecnológica.
- [34] Vallejos, Horacio R. [2006]. Capas mono granulares como membranas anti-fisuras. 8º Congreso Internacional Provia. Chile.
- [35] Buhler Aislan [2007]. Estudo do efeito de grelhas de reforço na restauração de pavimentos. Tese doutoral. Engenharia aeronáutica e Mecânica. San José Dos Campos, São Pablo, Brasil.
- [36] Pavco S. A. [2008]. Pavimentación y repavimentación con geosintéticos. Manual y software de diseño, Geosof PAVCO. Capítulo 7.
- [37] Geosistemas PAVCO S.A. [2009]. Manual de diseño con geosintéticos. Octava Edición. 442 p. Bogotá, Colombia.
- [38] Cleveland G. S.; Button J. W.; Lytton R. L. [2002]. Geosynthetics in Flexible and Rigid Pavements Overlay Systems to Reduce Reflection Cracking Report no. FHWA/TX-02/1777 Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, Texas, USA, pp. 1-297.
- [39] Prieto J. N.; Gallego J.; Pérez I. [2007]. Application of the wheel reflective cracking test for assessing geosynthetics in anti-reflection pavement cracking systems Geosynthetics International, Vol. 14, pp. 287-297.
- [40] Penman J.; Hook K. D. [2008]. The use of geogrids to retard reflective cracking on airport runways, taxiways and aprons Al-Quadi, Scarpas, Loizos (Eds.), Pavement Cracking, 978-0-415-47575-4. London, pp. 713-720.



- [41] Al-Qadi I.L.; Buttlar W. G.; Baek J.; Kim M. [2009]. Cost-Effectiveness and Performance of Overlay Systems in Illinois. Vol. 1: Effectiveness Assessment of HMA Overlay Interlayer Systems Used to Retard Reflective Cracking, FHWA-ICT-09-044 Illinois Center of Transportation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois pp. 1-195.
- [42] Chowdhury A.; Button J. W.; Lytton R.L. [2009]. Tests of HMA Overlays Using Geosynthetics to Reduce Reflection Cracking Report No. FHWA/TX-10/0-1777-3, pp. 1-100.
- [43] Pereira, A. S. [2002]. Utilização de Geotêxtil em Reforço de Pavimentos Aplicado em um Trecho Experimental. Tese de Msc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [44] Norma IRAM 78002 [1997]. Deformación de la masa por unidad de área. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- [45] Norma IRAM 78004-1 [2001]. Determinación del espesor a presiones prefijadas. Parte 1: Capas individuales. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- [46] Norma IRAM 78012 [2001]. Ensayo de tracción con probetas anchas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Primera edición 20-4-2001. pp. 1-16. Argentina.
- [47] Braun D. [1999]. Simple Methods for identification of plastics. Cincinnati: Ed. Hanser Gardener Publication.
- [48] Hesse M.; Meier H.; Zehh B. [1995]. Metodos espectroscopicos en quimica organica. Ed. Sintetisis. Madrid, España.
- [49] Conley Robert T. [1979]. Espectroscopía Infrarroja. Editorial Alhambra 1979, 1ª edición, 346 p.



CAPÍTULO VI

CAPA ASFÁLTICA DE REFUERZO

Se realiza el diseño de la mezcla asfáltica tipo CAC D20 para la investigación siguiendo los lineamientos del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad, la misma se utiliza durante toda la parte experimental.

Los parámetros de la mezcla asfáltica son controlados diariamente, realizando un control estadístico mediante cartas de control, lo que permite mantener los parámetros lo más uniformes posibles, en especial el contenido de ligante por ser uno de los factores determinantes en la adherencia entre materiales poliméricos, el comportamiento de la mezcla asfáltica con el material geosintético y la emulsión asfáltica.



VI.1 INTRODUCCIÓN

La estructura de un pavimento esta constituida por un conjunto de capas superpuestas que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados, Figura VI.1.

Estas estructuras se apoyan sobre la subrasante de un camino, obtenida en el proceso de movimiento de tierras de la explotación, la cual debe resistir y transmitir adecuadamente los esfuerzos de cargas repetidas, debidas al tránsito, a la subrasante o capa subyacente para que sean soportadas por ésta, además de proporcionar una superficie de rodamiento económica, cómoda y segura a los usuarios, facilitando la circulación de los vehículos. [1] [MIRANDA REBOLLEDO R. J., 2010]

Las capas más utilizadas son [2] [BRAVO MOLINA et al., 2008]:

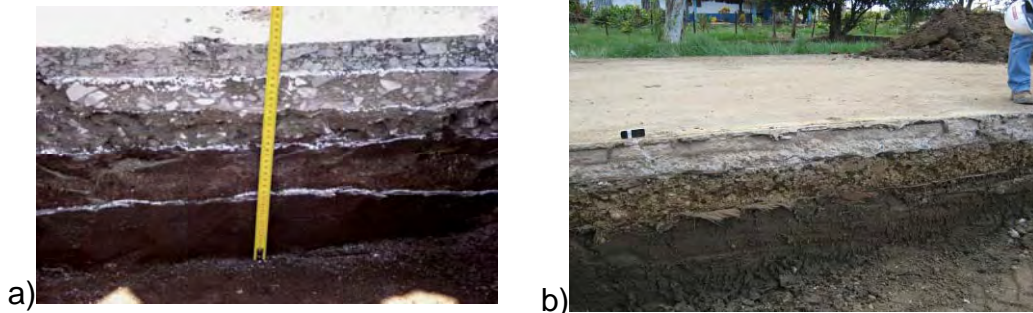
Capa de rodadura: es la parte superior del pavimento y su función es soportar las cargas del tránsito. La superficie debe ser uniforme y estable, con adecuada textura y color. Para los pavimentos rígidos, las losas de hormigón deben cumplir con las mismas funciones de la capa de rodadura de los pavimentos asfálticos.

Base: su función principal es absorber y transmitir a la subbase y a la subrasante la mayor parte de los esfuerzos verticales que se generan por el paso de los vehículos. Para el tránsito medio y ligero se utilizan bases granulares mientras que para tránsito pesado se utilizan bases tratadas con ligante o conglomerante.

Subbase: proporciona a la base un cimiento uniforme y debe soportar los esfuerzos transmitidos por las capas superiores. Además debe drenar el agua que se introduzca a través de la capa de rodadura, al igual que evitar la ascensión capilar. En pavimentos de hormigón debe impedir el efecto de bombeo de finos en las juntas, fisuras y extremos del pavimento.



Subrasante: es la capa que finalmente debe resistir todas las cargas que circulan sobre el pavimento. Algunas veces esta capa esta conformada solamente por la superficie del terreno.



**Figura VI.1 Distintas capas que conforman un pavimento
a) Flexible b) Rígido**

La Comisión Permanente del Asfalto [3] [CPA, 2006] define como mezcla asfáltica en caliente a la combinación de un ligante asfáltico convencional o modificado, áridos (incluido filler) y eventualmente aditivos tales como mejoradores de adherencia, fibras, etc., fabricadas en plantas y colocadas en obra a temperatura muy superior a la ambiente. Las mezclas definidas en las Especificaciones de la CPA, tienen por objeto ser utilizadas como carpetas de rodamiento, capas intermedias y bases tanto en obras nuevas o como parte de refuerzos estructurales de pavimentos existentes.

La mezcla asfáltica es un material de probada satisfacción cuando se constituyen en carpeta de rodamiento o bases para paquetes estructurales de caminos [4] [RICCI L., 2011].

Por la calidad de rodadura brindada, su rápida habilitación al tránsito, y su competitividad económica con relación a otras alternativas tecnológicas disponibles en el mercado, se constituye en la opción preferida por los contratistas y usuarios a la hora de pavimentar y repavimentar caminos. Las mezclas asfálticas son constituidas por una matriz de agregados que le confieren resistencia al corte por fricción intergranular, unida por un ligante asfáltico que favorece la energía de cohesión.



En este tipo de carpetas, la propagación de una fisura comienza cuando el nivel de tensión y energía aplicado es suficiente para provocar el rompimiento de la fuerza de cohesión que el ligante asfáltico ofrece, causando un aumento en la separación de los agregados a través de los ciclos de carga y descarga [5] [FERREIRA DA SILVA A.; MONTESTRUQUE VILCHEZ G., 2000].

En general, los factores que determinan la duración de la superficie de una carpeta asfáltica nueva son: la fatiga por flexión, el envejecimiento natural, la formación de ahuellamientos, la abrasión, la formación de grietas por efecto de la temperatura y la fisuración refleja [6] [GARNICA ANGUAS et al., 2002].

VI.2 COMPONENTES Y TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

IV.2.1 Materiales componentes de la mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado [7] [KRAEMER C. et al., 2004], de manera que aquéllos queden cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en centrales (comúnmente llamadas plantas) fijas o móviles, se transportan mediante camiones a la obra y allí se extiende y se compacta.

La combinación de agregados pétreos, los cuales pueden o no estar presentes en mayor o menor medida, está compuesta por los siguientes elementos:

Agregado grueso: es la parte del agregado total retenida en el tamiz IRAM 4,75 mm [8] [norma IRAM 1501-2]. Comercialmente en el ámbito local, estas fracciones de agregados están constituidas principalmente por piedra partida 6:20, 6:12, etc. denominación que hace alusión al tamaño mínimo y máximo de las partículas que componen la fracción.



Agregado fino: es la parte del agregado total pasante por el tamiz IRAM 4,75 mm. Los agregados finos generalmente están constituidos, en mayor proporción, por arenas provenientes de la trituración de rocas comúnmente denominadas 0:6 también en referencia a su tamaño mínimo y máximo, y en menor proporción por arenas silíceas.

Relleno mineral: es la fracción pasante del tamiz IRAM 0,075 mm de la mezcla compuesta por los agregados y el relleno mineral de aporte.

Relleno mineral de aporte (filler de aporte): se define así a aquéllos que puedan incorporarse a la mezcla por separado y que no provengan de la recuperación de los agregados. En el ámbito local generalmente se emplea como filler de aporte la cal comercial.

El agregado constituye normalmente entre el 90% y el 95% en peso del total de la mezcla; es por ello que en las capas superiores del pavimento la influencia de la calidad de los áridos empleados tiene una vital importancia para lograr una mezcla estable y de buen comportamiento.

El ligante asfáltico interviene en las mezclas asfálticas en proporciones diferentes según el tipo de formulación; generalmente este valor oscila entre el 3% y el 10% sobre la masa de los agregados pétreos. Generalmente los asfaltos de mayor empleo son los que se conocen por su antigua clasificación de acuerdo al ensayo de penetración, como por ejemplo aquéllos de penetración intermedia (50/60 y 70/100); actualmente también tienen un uso generalizado los asfaltos modificados [7] [KRAEMER C. et al., 2004].

El asfalto está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contienen otros átomos, como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. La principal propiedad que le confiere el asfalto a la mezcla es su adhesividad o poder ligante, mediante el cual se mantienen íntimamente unidas las partículas de agregados. Otra de las propiedades importantes del ligante asfáltico es su impermeabilidad y la resistencia a la



mayoría de los ataques químicos que pueden generar los ácidos, álcalis y las sales. Por último, su susceptibilidad térmica o comportamiento termoplástico marcan su diferencia de comportamiento entre los distintos intervalos térmicos a los cuales puede estar expuesto. Los asfaltos convencionales poseen una elevada viscosidad a baja temperatura; a medida que se someten a temperaturas mayores su viscosidad desciende considerablemente.

La combinación de los componentes constitutivos de la mezcla debe ser tal que se logren los requerimientos comunes que se le exigen a las mezclas asfálticas, los cuales son [9] [BOLZAN PABLO, 2006]:

- Buena trabajabilidad;
- óptima cantidad de asfalto para asegurar durabilidad;
- adecuada estabilidad bajo cargas de tránsito;
- suficiente vacíos de aire, límite superior para prevenir los daños del clima y límite inferior para dar lugar a la post compactación.

Otras propiedades deseables de la mezcla son:

- Flexibilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Rigidez adecuada que presente un óptimo desempeño frente a cargas dinámicas.
- Resistencia al deslizamiento.
- Impermeabilidad.

IV.2.2 Tipos de mezclas asfálticas

En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a que están sometidas. Actualmente la modificación de los ligantes asfálticos se ha generalizado para caminos importantes, persiguiéndose la optimización de la respuesta



mecánica y de durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

En las Especificaciones de la Comisión Permanente del Asfalto (CPA, edición 2006) se definen, las siguientes mezclas asfálticas:

- CAC D 12: Concreto asfáltico convencional denso, tamaño máximo de agregado 12 mm (1/2").
- CAC S 12: Concreto asfáltico convencional semidenso, tamaño máximo de agregado 12 mm (1/2").
- CAD 12: Concreto asfáltico drenante, tamaño máximo de agregado 12 mm (1/2").
- MAC M8 y MAC M10: Microconcretos asfálticos de granulometría discontinua monogranulares, tamaños máximos de agregado 8 mm y 10 mm, respectivamente.
- MAC F8 y MAC F10: Microconcretos asfálticos de granulometría discontinua, tamaños máximos de agregado 8 mm y 12 mm, respectivamente.
- *CAC D 20: Concreto asfáltico convencional denso, tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4"). Concreto asfáltico de granulometría continua.*
- CAC S 20: Concreto asfáltico convencional semidenso, tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4"). Concreto asfáltico de granulometría continua.
- CAC G 20: Concreto asfáltico convencional grueso, tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4"). Concreto asfáltico de granulometría continua.
- CAC S 25: Concreto asfáltico convencional semidenso, tamaño máximo de agregado 25 mm (1"). Concreto asfáltico de granulometría continua.



- CAC G 25: Concreto asfáltico convencional grueso, tamaño máximo de agregado 25 mm (1"). Concreto asfáltico de granulometría continua.
- CAD 20: Concreto asfáltico drenante, tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4"). Concreto asfáltico con alto contenido de vacíos (>20%). La utilización de asfaltos modificados con polímeros es necesaria para su elaboración.
- SMA 10, SMA 12 y SMA 20: Concretos asfáltico tipo SMA (Stone Mastic Asphalt), tamaño máximo de agregado 19 mm (3/4"). Concretos asfálticos en caliente formados por un esqueleto pétreo autoportante y mástic con alto contenido de ligante asfáltico, filler y fibras, Figura VI.2.

Dependiendo de la granulometría del esqueleto granular empleado en la constitución de la mezcla asfáltica, el Pliego General de Especificaciones Técnicas de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) estipula los siguientes 5 tipos de mezclas asfálticas:

- Concreto asfáltico para base
- Concreto asfáltico para carpeta
- Suelo calcáreo arena – asfalto
- Arena – asfalto (gruesa)
- Arena – asfalto (fina)

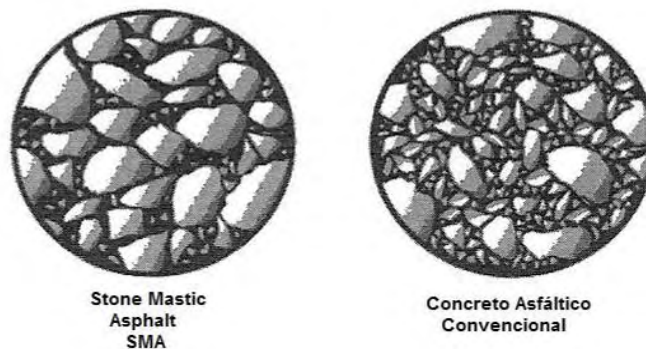


Figura VI.2 Estructura granular de una mezcla asfáltica CAC y una SMA

Fuente [10] [IOSCO O. A., 1999]



VI.3 FISURAS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

La reflexión de fisuras se considera uno de los principales problemas a resolver en la restauración de pavimentos. Varios estudios experimentales y teóricos se han llevado a cabo en los principales centros de investigación con el fin de encontrar alternativas para minimizar el fenómeno en los refuerzos asfálticos; en Argentina aún existe una necesidad de estudios experimentales de laboratorio y de campo sobre el tema.

Cuando el potencial de aparición de fisuras de reflexión en la capas asfálticas es alta (es decir, cuando el grado de agrietamiento del viejo pavimento es grande y de alta severidad), el simple aumento del grosor mediante la superposición de una nueva capa asfáltica, con el fin de obtener una vida de servicio igual al período del proyecto, tiende a ser ineficiente en términos económicos. En este sentido, un sistema anti-reflejo de fisuras, debe ser diseñado mediante la definición de la naturaleza de los materiales y los espesores de las capas constituyentes.

Estudios realizados en tramos experimentales muestran que la interfase entre la capa de rehabilitación (refuerzo) y la capa del pavimento existente es el mejor lugar para aplicar una solución para inhibir el mecanismo de la reflexión fisuras [11] [PINTO S., 1991].

El incremento de la viscosidad y la reducción de la ductilidad de los asfaltos en las mezclas producen paulatinamente el agrietamiento (cracking) de la superficie de la capa de rodadura, entre otros fenómenos.

El agrietamiento por temperatura puede producirse por dos situaciones: la primera por un descenso puntual de la temperatura que rompe la carpeta asfáltica y la segunda por la fatiga del material debido a la repetición de cargas. Estas dos condiciones involucran la propagación de fisuras en la carpeta asfáltica [12] [FERNANDEZ GOMEZ W. D. et al., 2011].



Una vez que la fisura se genera, ésta aumenta en longitud, intensidad y severidad, conduciendo a la ruptura de la capa colocada como refuerzo. Debido a estos efectos, la velocidad de deterioro del pavimento se acelera por lo general después de la iniciación de la formación de fisuras.

VI.3.1 Propagación de fisura por mecánica de la fractura

El fenómeno del reflejo de fisura puede ser entendido a través de los principios de la mecánica de la fractura, los que permiten una previsión de la vida de fatiga considerando la progresión de la fisura [13] [MONTESTRUQUE G., 2002]. La conexión cuantitativa entre tensión de fractura y el tamaño de la fisura fue establecida por primera vez por Griffith (1920); en 1957, Irwin analizando las tensiones próximas a la extremidad de la fisura, verifica que las tensiones locales, pueden ser representadas por un único parámetro, denominado de factor de intensidad de tensión (K) dado por:

$$K = \sigma \sqrt{\pi c} \beta$$

En esta ecuación, el factor de intensidad de tensiones está directamente relacionado a la tensión nominal aplicada σ y a la raíz cuadrada de la altura de la fisura c . El parámetro β depende del componente estructural y de la geometría de las fisuras. De este modo, para el cálculo del estado de tensiones en la extremidad de la fisura debe ser determinado el β adecuado para cada situación.

En 1963, París y Erdogan mostraron que la proporción de crecimiento de la fisura por ciclo de carga dc / dN puede ser descrita como función de la variación del factor de intensidad de tensión K , parámetro que describe todo el estado de tensiones en la extremidad de la fisura (Ley de Paris):

$$\frac{dc}{dN} = AK^n$$

Ley de Paris



donde A y n son constantes del material; ellas dependen de los materiales, la frecuencia y condiciones de temperatura.

Para la predicción del aumento de fisura debido al tránsito, el coeficiente n de manera general aumenta cuando la temperatura disminuye. Esto se puede afirmar debido a que a bajas temperaturas los materiales asfálticos son más frágiles.

El parámetro A puede calcularse, según Molenaar (1983) citado por [2] [BRAVO MOLINA et al., 2008], utilizando la relación empírica siguiente:

$$\log A = - 2,36 - 1,14n$$

La Ley de París implica que la fisura va a propagarse a partir de la iniciación de la misma como una discontinuidad plana a través del material, pero esta hipótesis no tiene en cuenta la heterogeneidad propia de los materiales asfálticos. Además indica que si el factor de intensidad de tensiones disminuye, la propagación de fisura también disminuye.

Un ejemplo propuesto por Koerner en su libro “Designing of geosynthetics” [14], explica cómo se puede utilizar la Ley de París para estimar la duración de la vida útil del pavimento. Establece 100 mm de capa asfáltica en la parte superior de un pavimento muy agrietado de base consolidada y estima una zona del pavimento sujeto a un diseño de número de tránsito (DTN) = 100.000 ciclos / año. Para el tipo de superestructura el parámetro K asume el valor de $K = 0,0002$ y $A = 1,5$, respectivamente la constante $n = 1$ y en la ecuación que involucra el log A, toma el valor $n = 4,3 \times 10^{-8}$.

Partiendo de estas premisas, se puede determinar:

- la tasa media de crecimiento de la fisura y la vida útil del pavimento (en número de ciclos y en años), sin refuerzo;



- el mismo problema utilizando diversos tipos de materiales geosintéticos para lo cual asume los siguientes valores del parámetro A:
 1. Geotextil no tejido: A= 0,50 (Koerner)
 2. Geomalla PP: A= 0,35 (Koerner)
 3. Geomalla en PET: A= 0,33 (Molenaar)
 4. Geomalla en fibras de vidrio: A= 0,25 (Koerner)

La solución es que se puede calcular la tasa de crecimiento de la fisura y la vida útil del pavimento con y sin refuerzo, determinado cual es la alternativa más conveniente [15] [DAVIDE ROSETTO, 2011]:

$$N = T/(dc/dN) = 100/0,0002 = 500.000 \text{ ciclos (5 años)}$$

Sin embargo, el Dr. Montestruque comenta en una de sus presentaciones orales, que cuando se interpone un material geosintético con objeto de coser la fisura, este procedimiento no resulta adecuado debido a que se modifican las condiciones de tensiones producidas en la extremidad de la fisura.

VI.3.2 Propiedades de la mezcla vinculadas con la fisuración

VI.3.2.1 Contenido de asfalto y espesor de recubrimiento

El contenido de asfalto en la mezcla es un factor importante a considerar para obtener mezclas más resistentes a la fisuración [16] [VALDEZ VIDAL G. 2011].

A su vez, el espesor teórico de recubrimiento, está en función del contenido específico de asfalto y de las características superficiales del agregado. Recubrimientos muy finos contribuyen a un envejecimiento prematuro de la mezcla lo que lleva consigo un incremento en la fragilidad de ésta. Estudios realizados por Kandhal y Chakraborty; Sengoz y Agar



(2006), señalan que el espesor de recubrimiento óptimo fluctúa entre 9,5 y 10,5 micrones.

VI.7.2 Módulo de rigidez

Es la propiedad definida como la relación entre el esfuerzo y la deformación. En el caso de las mezclas asfálticas, el módulo de rigidez está en función de la temperatura, tiempo y tipo de carga, debido principalmente a las características viscoelastoplásticas y susceptibilidad térmica, propias de este material. Por otro lado, la rigidez de la mezcla también es afectada por la rigidez del ligante utilizado, granulometría, contenido de vacíos y contenido de asfalto. Además en las mezclas con el paso del tiempo se produce un fenómeno de oxidación del ligante, lo que conlleva a un envejecimiento, es decir, un aumento de la rigidez en el material produciendo que la mezcla se vuelva más frágil y menos resistente a la fisuración [16] [VALDEZ VIDAL G. 2011].

VI.7.3 Contenido de vacíos

El contenido de vacíos, que está en función de la granulometría y del grado de compactación de la mezcla, también está en directa relación con la velocidad de oxidación de la mezcla, puesto que a mayor contenido de vacíos, el agua y el aire oxidan el ligante de la mezcla acelerando la tasa de envejecimiento de ésta, incrementando su fragilidad, por ende, resultando una menor resistencia a la fisuración de la mezcla asfáltica.

VI.7.4 Granulometría y tipo de agregado

El efecto de la granulometría y tipo del agregado tienen un papel importante en la respuesta de la mezcla asfáltica frente a las fallas producidas por las sollicitaciones de tránsito y medioambientales. Existe una influencia directa de la granulometría y tipo del agregado en el esqueleto mineral de la mezcla asfáltica, que por una parte soporta las tensiones producto de las cargas de los vehículos, y por otra, condicionan



la respuesta que es capaz de tener la mezcla frente a las tensiones inducidas producto de los gradientes térmicos.

VI.7.5 Consistencia y viscosidad del asfalto

Las propiedades de consistencia y viscosidad son unas de las características típicas de los ligantes asfálticos y que más definen su comportamiento en la mezcla. Según Pérez y Bardesi (2006) la consistencia del ligante a temperatura ambiente (25 °C) y las temperaturas en que se producen sus cambios más significativos, son los parámetros que se han utilizado para caracterizar los ligantes y el comportamiento de la mezcla, puesto que a bajas temperaturas la mezcla se comporta como un sólido frágil, siendo ésta más susceptible al fallo por fisuración, mientras que a temperaturas más altas, la mezcla tiene un comportamiento mas dúctil y menos resistente.

VI.2 REFUERZO ASFÁLTICO SOBRE EL HORMIGÓN

En la construcción de caminos existe gran número de parámetros que afectan la adhesividad y la durabilidad; éstos abarcan desde la selección de materias primas hasta la aplicación final del propio pavimento.

Al colocarse una capa asfáltica sobre un pavimento de hormigón, en especial en coincidencia con la junta, las losas concurrentes por el efecto de la contracción térmica y por adherencia tienden a arrastrar la capa asfáltica creando tensiones de tracción en la fibra inferior de la misma; este proceso se continua reiterando hasta el momento en que ésta agote su resistencia por fatiga y en la sección sobre la junta o muy próximo a ella se produzca una apertura en el plano inferior, convirtiéndose en pequeñas fisuras imperceptibles. Al seguir con los ciclos térmicos y las sollicitaciones de flexión y corte producida por la carga del tránsito, la tensión producida se concentra en la punta de la fisura, generada sobre la capa asfáltica, hasta que la misma alcance la superficie.



Generalmente, antes de la introducción de los materiales geosintéticos en la restauración de obras viales, con objeto de retardar la fisuración refleja, los pavimentos deteriorados se cubren con mezcla asfáltica de cierto espesor, previa reparación de las grietas existentes u otros tipos de fallas. Esto permite aumentar la longitud del recorrido de la fisura y retardar así la aparición en la superficie.

Sin embargo, Esto no genera una solución duradera ya que, después de varias investigaciones realizadas sobre el tema, el problema aparece nuevamente al cabo de un corto tiempo.

Actualmente algunas entidades continúan con esta metodología.

Estudios franceses declaran que para un espesor de 8 cm de carpeta asfáltica, la fisura surge al cabo de 5 años, y que para evitar la aparición de la fisura en la superficie en 8 años, se requieren 20 cm de espesor de carpeta asfáltica [17] [PARDO ROJAS M. y CANATA ZAROR M., 2001].

Los materiales geosintéticos, según su función, pueden ser partes constituyentes de un sistema denominado pavimento, tanto en obra nueva como en la rehabilitación de un pavimento deteriorado. El sistema debe actuar solidariamente para que la relación íntima lograda entre sus componentes derive en un comportamiento satisfactorio de la estructura en su conjunto y no sea sólo derivado del comportamiento individual de cada parte constituyente.

En un sistema multicapa, los movimientos relativos entre las capas componentes son un origen importante de fisuras. Cuando la adherencia entre capas no es buena, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana, ante las sollicitaciones del tránsito y el clima. Esta falta de vínculo se traduce también en una mala o nula distribución de tensiones en el espesor total del pavimento [4] [RICCI L., 2011].

Por ello, se deben considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un pavimento [18] [PADILLA RODRIGUEZ A., 2004]:



- La función resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que se emplean en su construcción
- La finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del camino para que resulten seguras y confortables

VI.8 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA LA INVESTIGACIÓN

VI.8.1 Aspectos considerados

En la determinación del tipo de mezcla asfáltica a utilizar se tienen en cuenta factores como frecuencia de su uso en repavimentación, materiales de fácil obtención y que cumplan con las especificaciones técnicas de un pavimento de alto tránsito.

Considerando estos factores, la mezcla asfáltica seleccionada, como carpeta de refuerzo sobre el hormigón, es un concreto asfáltico convencional denso Tipo CAC D20 elaborado en caliente. La misma se diseña previamente en laboratorio para lograr probetas patrones de análisis y obtener los parámetros necesarios para el plan de moldeo.

Una vez obtenidos los resultados del diseño de la mezcla asfáltica, la procedencia de la misma corresponde de una empresa comercial de la región la cual elabora sus mezclas mediante una planta asfáltica fija por pesadas, que provee al Municipio de la Ciudad de La Plata para la realización de carpetas de calles urbanas. Esto permite la toma de muestras diariamente para llevar a cabo el conjunto de todos los ensayos requeridos en la presente tesis. Se realiza un control estadístico de la mezcla de manera de considerarla como constante para todo el trabajo.

VI.8.2 Caracterización de la mezcla asfáltica

La mezcla seleccionada se caracteriza mediante las exigencias dispuestas en el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la



Dirección Nacional de Vialidad, sección D VIII, Bases y carpetas preparadas en caliente, edición 1998 [19], en las especificaciones de la Comisión Permanente del Asfalto, especificaciones del 2006 y finalmente en las Especificaciones Técnicas Generales de concretos asfálticos Densos, Semidensos y Gruesos en caliente, en su punto 3.1 Criterios de dosificación.

La Tabla VI.1 presenta los resultados de los ensayos de laboratorio. Los mismos se obtienen mediante el ensayo Marshall, el cual permite caracterizar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica. Así, las probetas confeccionadas se ensayan según la Norma VN – E9 – 86 [20].

Tabla VI.1 Resultados y exigencias para un Concreto Asfáltico Convencional CAC D20

Ensayo	Resultado	Exigencia
Vacíos (%)	3,5	3 – 5
Relación Betún - Vacíos (%)	77	68 – 78
Estabilidad (Kg)	919	>800
Porcentaje de vacíos de agregado mineral	15,0	>14
Porcentaje mínimo de ligante (%)	4,9	5,0
Relación Estabilidad – Fluencia (Kg/cm)	3465	2500 – 4500

Nota: El cemento asfáltico empleado es del tipo CA-30.

Las Figuras VI.3 a la VI.8 muestran los pasos para el diseño de la mezcla.



Figura VI.3 Equipamiento empleado para confección de probetas



Figura VI.4 Compactador Marshall y equipo para desmolde de probetas



Figura VI.5 Determinación de peso al aire y peso sumergido de probetas Marshall



Figura VI.6 Inmersión en baño de agua termostataizado a 60 °C durante 40 minutos y ensayo de estabilidad/fluencia de las probetas



Figura VI.7 Disgregado y cuarteo de la mezcla para Densidad Rice y Recuperación



Figura VI.8 Determinación de Densidad Rice

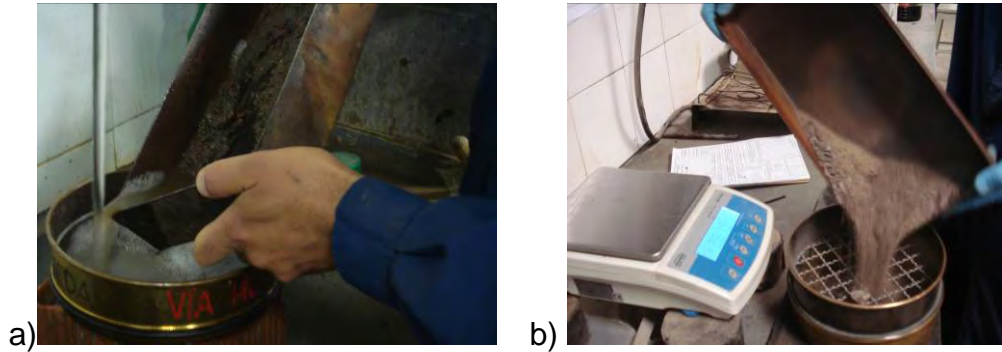
Luego se procede a la recuperación del asfalto, estipulada en el procedimiento VN – E69 – 78 Determinación del Contenido de Asfalto en Mezclas en caliente por el Método de Centrífuga de finos, determinándose el porcentaje de cemento asfáltico [21] [DNV 2008], Figura VI.9 y Figura VI.10. Con los agregados recuperados se establece la curva granulométrica de la estructura granular, Figura VI.12.



Figura VI.9 Determinación del contenido de asfalto por centrífuga



Figura VI.10 recuperación de finos mediante centrífuga de vasos



**Figura VI.11 Granulometría de áridos recuperados
a) vía húmeda; b) vía seca**

Los resultados obtenidos se vuelcan en la Tabla V.2.

Tabla V.2 Parámetros de la mezcla asfáltica CAC D20

Diseño de mezcla asfáltica tipo CAC D20

LEMaC / UTN - FRLP

Nº de Lab.	Material = Mezcla asfáltica				inf. Nº Exped. =	
Fecha =	07/01/2010	Hora de inmersión =	1h	24h	inf. Nº Laborat. =	
Aro =	3 Tn	Cte. =	8,636	Nº de golpes por cara =	50	75

Este ensayo ha sido efectuado siguiendo los lineamientos de la NORMA VN - E9 - 86

Nº de Probeta	Peso en aire	Peso sumerg.	Volumen	Densidad	Estabilidad		Estabilidad corregida	Fluencia	Relacion Est/Fluen	Vacios
	gramos	gramos	cm ³	g/cm ³	lectura	fact corr	kg.	mm	kg/cm	%
1	1198	689	510	2,352	101	1,00	872	2,5	3489	3,3
2	1190	686	503	2,363	102	1,04	916	3,1	2955	2,8
3	1200	689	511	2,348	103	1,00	890	3,2	2780	3,4
4	1163	666	498	2,337	105	1,04	943	2,2	4287	3,9
5	1187	681	506	2,345	107	1,04	961	2,2	4368	3,6
6	1191	682	509	2,339	108	1,00	933	3,2	2915	3,8
Promedio	1188,3	682,1	506,2	2,347	104,3	1,0	919,1	2,7	3465,6	3,5

Densidad Rice (g/cm³)= Dr

	Ensayo 1	Ensayo 2
Muestra Nº =	1	2
Densidad K =	1,000	1,000
Peso de frasco + k P1 =	3440	3441
Peso de muestra P2 =	1059	1098
Peso de frasco + k + muestra P3 =	4063	4088
Peso de muestra sumergida P4=P3-P1 =	623	647
Volumen de muestra (P2 - P4)/Dk =	436	451
Densidad max = Dr =	2,429	2,435
Dr Promedio =	2,432	

Densidad Marshall Promedio (g/cm³) = Dm

2,347

Vacios Promedio (%) = Vm

3,5

Vacios agregado mineral (VAM) (%)

15,0

Recuperación de betun / VN - E69 - 78 (%) C.A.

	Ensayo 1	Ensayo 2
Muestra Nº =	1	2
Peso de muestra P1 =	1378	1249
Peso de pétreos P2 =	1309	1189
% de Asfalto = (P1-P2)*100/P1 =	5,0	4,8
% de Asfalto Promedio =	4,9	

Relación Betun / Vacio (%)

76,9

Factores de correcc. por volumen	444	456	1,25
	457	470	1,19
	471	482	1,14
	483	495	1,09
	496	508	1,04
	509	522	1,00
	523	535	0,96
	536	546	0,93
	547	559	0,89
	560	573	0,86
	574	585	0,83
586	598	0,81	

Análisis granulométrico de los agregados recuperados
Curvas límites dadas por la CPA y la DNV

Tamiz	P.R.A.	% R.A.	Lim. Inf.	% Pasa	Lim. Sup.
1"	0,0	0,0	100	100,0	100
3/4"	0,0	0,0	100	100,0	100
1/2"	214,4	15,6	85	84,4	100
# 4	581,0	42,2	53	57,8	80
# 10	804,6	58,4	35	41,6	60
# 40	1000,0	72,6	20	27,4	40
# 80	1156,0	83,9	10	16,1	30
# 200	1332,0	96,7	3	3,3	10
Fondo	1370,0	99,4		0,6	



La curva granulométrica de los áridos recuperados presenta buena integración entre los límites impuestos en el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad, y entre los usos granulométricos impuestos por la CPA en sus Especificaciones Técnicas de Mezclas Asfálticas en Caliente para una CAC D20, Figura VI.12.

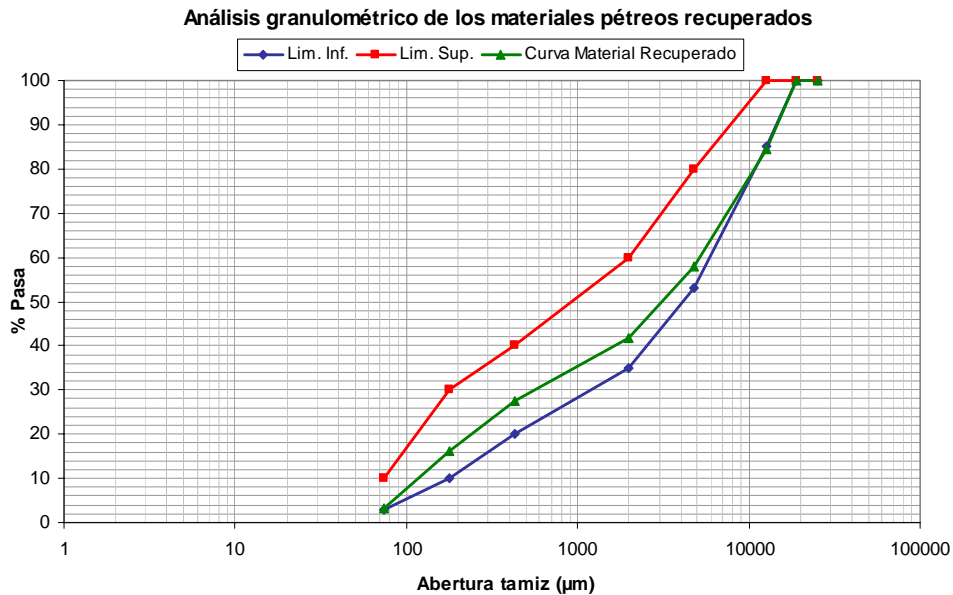


Figura V.12 Curva granulométrica de los áridos recuperados

La mezcla cumplen con los límites impuestos para concretos asfálticos para carpeta de rodamiento. Por ello, es la seleccionada para las experiencias.



V.9 REFERENCIAS

- [1] Miranda Rebolledo Ricardo Javier [2010]. Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Valdivia, Chile.
- [2] Bravo Molina L. E.; Ortega Bohórquez D. C.; Torra Calderón G. R. [2008]. Capas anti-reflejo de fisuras en pavimentos. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería Físico-mecánicas. pp. 1-218. Bucaramanga, Colombia.
- [3] Comisión Permanente del Asfalto, CPA [2006]. Especificaciones Técnicas Generales de concretos asfálticos Densos, Semidensos y gruesos en caliente. Vol 1. Argentina.
- [4] Ricci L. A. [2011]. Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercala de geosintético. Tesis de Maestría en Ingeniería del Transporte, orientación vial de la FIUBA. Argentina.
- [5] Ferreira Da Sila André E.; Montestruque Vilchez G. [2000]. Experimental evaluation of a polyester geogrid as an anti-reflective cracking interlayer on overlays. Second European Geosynthetic conference. Bologna. Italia.
- [6] Garnica Anguas P.; Gomez Lopez J. A.; Sesma Martinez J. A. [2002]. Mecánica de materiales para pavimentos. Secretaria de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte. Publicación técnica No. 197. ISSN: 0188-7297. Sanfandila, México.
- [7] Kraemer Carlos; Pardillo José Maria; Sandro Rocci [2004]. Ingeniería de Carreteras. Vol. 1 y Vol. 2. McGraw Hill/ Interamericana de España S.A. España.



- [8] Norma IRAM 1501-2. Tamices de ensayo. Tela de tejido metálico, chapa metálica perforada y lámina electroformada. Tamaños nominales de abertura. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Argentina.
- [9] Bolzán Pablo [2006]. Las Mezclas Asfálticas y su Diseño en Revestimientos Viales. Maestría en Ingeniería del Transporte – Orientación Vial – UBA. Argentina.
- [10] losco O. A. [1999]. Resistencia a las deformaciones de las mezclas con asfaltos modificados. Nuevos materiales y mezclas asfálticas especiales para pavimentos. CIC-LEMIT. Argentina.
- [11] Pinto, S. [1991]. Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese D. Sc. COPPE/UFRJ. Río de Janeiro. Brasil.
- [12] Fernández Gómez Wilmar Darío, Quintana Hugo Rondón, Lizcano Reyes Fredy [2011]. Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento. Universidad Distrital Francisco José de Caldas grupo de Topografía e Infraestructura Vial TOPOVIAL.
- [13] Montestruque Vilchez Guillermo E. [2002]. Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflejo de trincas. Tesis Doutoral. São José Dos Campos. Universidad de São Pablo, Brasil.
- [14] Koerner Robert M. [2005]. Designing with Geosynthetics. Fifth edición. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. ISBN 0-13-145415-3. 796 p.



- [15] Davide Rosetto; Lorenzo Frigo [2011]. L'utilizzo delle geogriglie per contrastare il fenomeno dell'ammaloramento dei manti stradali e i metodi di calcolo per il dimensionamento di strade rinforzate. Contrastare il reflective cracking per allungare la vita utile della strada. *Materiali & Inerti. Strade & Autostrade* 5-2011. pp. 136-139.
- [16] Valdez Vidal, Gonzalo Alfonso [2011]. Evaluación de proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental, *Ensayo Fénix*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. 170 p.
- [17] Pardo Rojas Marcos A. y Canata Zaroro María Teresa [2001]. Malla metálica para la reflexión de grietas en recapados asfáltico.
- [18] Padilla Rodríguez, Alejandro [2004]. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. *Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori*. España.
- [19] Dirección Nacional de Vialidad (DNV) [1998]. Pliego de Especificaciones Técnicas Generales. Argentina.
- [20] Norma VN – E9 – 86 [2008]. Ensayo de Estabilidad y Fluencia por el Método Marshall Dirección Nacional de Vialidad. Dirección Nacional de Vialidad – Edición 2008 1º Distrito Buenos Aires. Argentina.
- [21] Dirección Nacional de Vialidad (DNV) [2008]. Consejo Sectorial de Ministros de Transporte de Centro America - Secretaria de Integración Económica Centroamericana. Dirección Nacional de Vialidad – Edición 2008 1º Distrito Buenos Aires - Argentina.

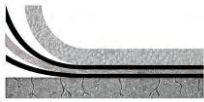


CAPÍTULO VII

DISEÑO DE LOS SISTEMAS, ENSAYOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este Capítulo presenta los diferentes sistemas considerados para el estudio. Se describen los modelos de sollicitación dinámica, implementados y desarrollados para el estudio de la propagación de fisuras sometidos a diferentes condiciones de borde (flexión y corte) y temperatura, y los ensayos adoptados para el estudio de la adherencia entre capas mediante tracción directa y a corte por flexión.

Se detallan los pasos para la confección de las probetas, sistemas de apoyo y procedimiento de los ensayos, de manera que puedan ser reproducidos de manera sencilla. Se discuten los resultados obtenidos en los ensayos realizados.



VII.1 INTERPOSICIÓN DE GRILLAS POLIMÉRICAS ENTRE CAPAS DE UN PAVIMENTO

VII.1.1 Sistemas diseñados

Se estudian diferentes sistemas, considerados en la rehabilitación de un pavimento deteriorado, utilizando materiales geosintéticos de diferente composición polimérica y conformación estructural, interpuestos entre una capa de hormigón (que simula la base deteriorada a rehabilitar) y una capa asfáltica tipo CAC D20 (que representa la capa de rodamiento), utilizando como material de liga una emulsión asfáltica modificada con polímero SBS, catiónica de rotura rápida (ECRR-M).

Para cuantificar el beneficio de los materiales considerados en la interfase del sistema multicapas, se diseña el de referencia el cual no considera la intervención de un material geosintético, Sistema 1. También se considera en los estudios la intervención de una capa intermedia de arena asfalto, por ser un material utilizado como sistema anti-fisura, y el cual generalmente se coloca como capa de nivelación, antes de la colocación de un material geosintético, Sistema 2.

Figura VII.1a

Sistema 1 (referencia): Base de hormigón + emulsión ECRR-M + mezcla asfáltica tipo CAC D20



Figura VII.1b

Sistema 2: Base de hormigón emulsión ECRR-M + arena asfalto de 2 cm de espesor + emulsión ECRR-M + mezcla asfáltica tipo CAC D20



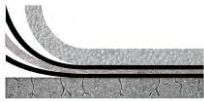


Figura VII.1c

**Sistema 3: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + arena
asfalto + emulsión ECRR-M +
material HSK PET + mezcla
asfáltica tipo CAC D20**



Figura VII.1d

**Sistema 4: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + material
HSK PET + mezcla asfáltica
tipo CAC D20**

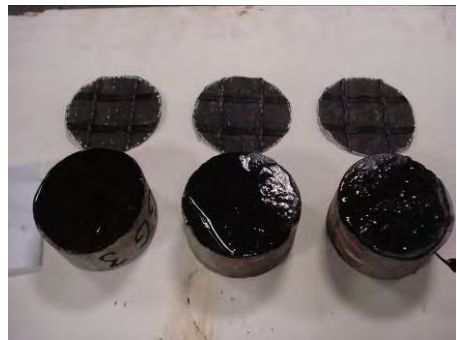


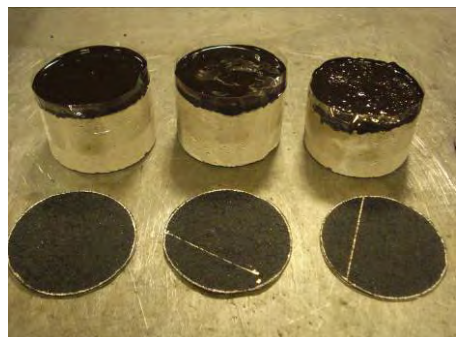
Figura VII.1e

**Sistema 5: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + material
MAC PET + mezcla asfáltica
tipo CAC D20**



Figura VII.1f

**Sistema 6: Base de hormigón
+ emulsión EBRR-M + material
RBK PET + mezcla asfáltica
tipo CAC D20**



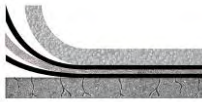


Figura VII.1g

**Sistema 7: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + material
HSK PVA + mezcla asfáltica
tipo CAC D20**



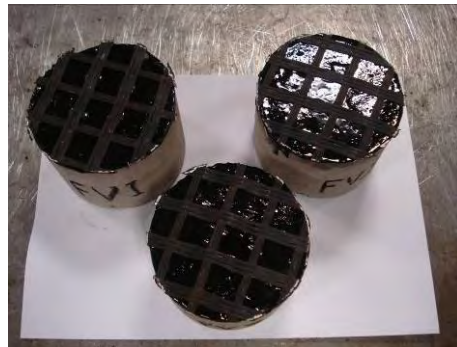
Figura VII.1h

**Sistema 8: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + material
FM PP + emulsión ECRR-M +
mezcla asfáltica tipo CAC D20**



Figura VII.1i

**Sistema 9: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + material
GR FV + mezcla asfáltica tipo
CAC D20**



Los materiales considerados del Sistema 3 al Sistema 9 son materiales que se encuentran en el mercado. Los mismos son considerados en la investigación por convenios con empresas interesadas en valorar sus productos, de los cuales no se tienen datos ni experiencias en cuanto a la adherencia entre capas de un pavimento.

En el transcurso de la investigación, a través de la transferencia tecnológica lograda con las empresas, se diseñan nuevos materiales; el material HSK PET, adosado a una membrana bituminosa, Figura VII.1j y el material FM PP arena, interpuesto entre dos membranas bituminosas, donde a la membrana superior se le realiza un tratamiento de arena para brindar rugosidad al material, Figura VII.1l.



Otro sistema considerado, por ser el más utilizado históricamente en la prevención de la fisuración refleja en nuestro país, consiste en un Geotextil No Tejido en poliéster de 150 g/m² embebido en emulsión asfáltica modificada al que se denomina como GNT PET 150 g., Figura VII.1k.

Figura VII.1j

**Sistema 10: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M +
membrana polimérica +
material HSK PET + mezcla
asfáltica tipo CAC D20**



Figura VII.1k

**Sistema 11: Base de
hormigón + emulsión ECRR-
M + material GNT PET 150 g.
+ emulsión ECRR-M + mezcla
asfáltica tipo CAC D20**



Figura VII.1l

**Sistema 12: Base de hormigón
+ emulsión ECRR-M + material
FM PP arena+ mezcla asfáltica
tipo CAC D20**



Paralelamente al estudio sobre la colocación de los materiales geosintéticos sobre una base de hormigón, se llevan a cabo ensayos de adherencia y propagación de fisura utilizando una base asfáltica para algunos de los sistemas propuestos. Esto se realiza con objeto de valorar



el comportamiento de los materiales sobre uno u otro tipo de sustrato. Los sistemas analizados son los siguientes:

Figura VII.1m

**Sistema 13 (referencia):
Base asfáltica tipo CAC D20 +
emulsión ECRR-M + mezcla
asfáltica tipo CAC D20**



Figura VII.1n

**Sistema 14: Base asfáltica tipo
CAC D20 + emulsión ECRR-M +
Arena Asfalto + emulsión ECRR-
M + mezcla asfáltica tipo CAC
D20**

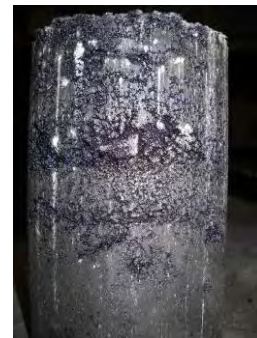


Figura VII.1o

**Sistema 15: Base asfáltica tipo
CAC D20 + emulsión ECRR-M +
material HSK PET + mezcla
asfáltica tipo CAC D20**



Figura VII.1p

**Sistema 16: Base asfáltica tipo
CAC D20 + emulsión ECRR-M +
material MAC PET + mezcla
asfáltica tipo CAC D20**



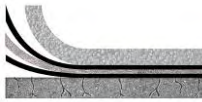


Figura VII.1q

Sistema 17: Base asfáltica tipo CAC D20 + emulsión ECRR-M + material FM PP + emulsión ECRR-M + mezcla asfáltica tipo CAC D20



Figura VII.1r

Sistema 18: Base asfáltica tipo CAC D20 + emulsión ECRR-M + GR FV + mezcla asfáltica tipo CAC D20



Figura VII.1s

Sistema 19: Base asfáltica tipo CAC D20 + emulsión ECRR-M + material GNT PET 150 g + emulsión ECRR-M + mezcla asfáltica tipo CAC D20



Figura VII.1t

Sistema 20: Base asfáltica tipo CAC D20 + emulsión ECRR-M + RBK PET + mezcla asfáltica tipo CAC D20



Figura VII.1u

Sistema 21: Base asfáltica tipo CAC D20 + emulsión ECRR-M + material FM PP arena + emulsión ECRR-M + mezcla asfáltica tipo CAC D20





VII.1.2 Análisis de la interfase

Las propiedades físicas y mecánicas dependen de las propiedades de los materiales que lo constituyen; por ello, es de vital importancia tener información sobre las interacciones que se producen entre los materiales del sistema compuesto como el considerado.

La interfase es una región de tamaño desconocido y variable. Esta región es decisiva para la transferencia de carga de la matriz al refuerzo.

Se obtienen imágenes, mediante lupa Olympus a la que se le adaptó una cámara Olympus QColor 3, de la unión lograda en la interfase del sistema. Cuando se utiliza el material FM PP, FM PP arena o RBK PET, éstos se adaptan bien a la superficie observándose buena transición entre los materiales logrados por parte de la emulsión y la membrana propia del material, Figura VII.2. En el caso de las grillas de malla abierta (ej. HSK PET) estas crean mayor perturbación, debido a su espesor variable, donde el agregado debe acomodarse, Figura VII.3.



Figura VII.2 Interfase hormigón + emulsión + material FM PP + emulsión + mezcla asfáltica

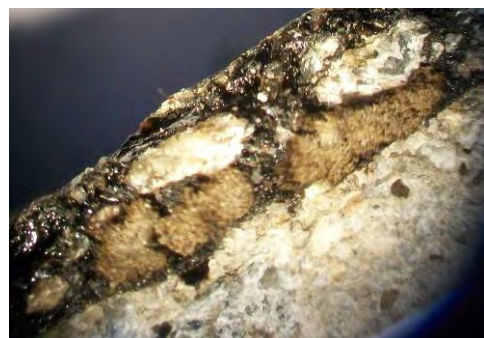
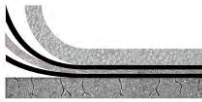


Figura VII.3 Interfase hormigón + emulsión + material HSK PET + mezcla asfáltica

La superficie del hormigón presenta mayor uniformidad superficial con bajo contenido de vacíos a diferencia de la mezcla asfáltica. Esos vacíos generan una discontinuidad en el contacto con el material geosintético, permitiendo el anclaje mecánico, Figuras VII.4 y VII.5.



**Figura VII.4 Interfase mezcla
asfáltica + emulsión + material FM
PP + emulsión + mezcla asfáltica**

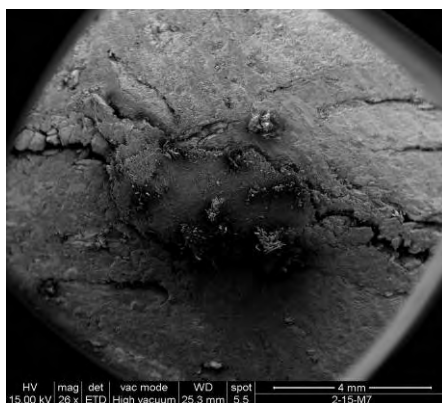


**Figura VII.5 Interfase mezcla
asfáltica + emulsión + material
HSK PET + mezcla asfáltica**

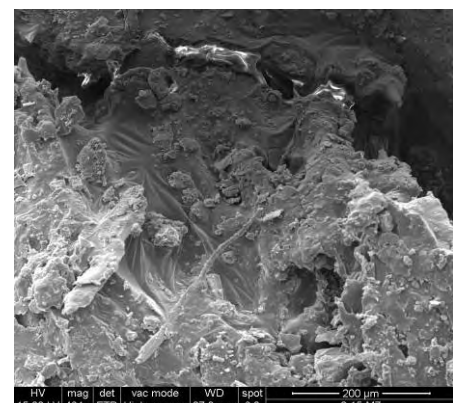
El estado superficial del pavimento y el material geosintético utilizado son condicionantes importantes a tener en cuenta a la hora de alcanzar la adherencia esperada entre los materiales componentes del sistema.

Se realiza el ensayo de espectroscopía electrónica de barrido (SEM) con objeto de observar la interfase del sistema.

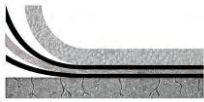
La Figura VII.6 presenta la interposición del material HSK PET entre capas asfálticas, mientras que la Figura VII.7 muestra cómo la emulsión asfáltica produce continuidad entre los materiales, mediante la difusión del polímero que la compone, beneficiando la fuerza de enlace.



**Figura VII.6 Interposición entre
capas de una grilla de malla abierta**



**Figura VII.7 Emulsión
recubriendo la interfase**



Se realiza el ensayo de espectroscopía por rayos X (EDAX), a un voltaje de aceleración de 20 Kv, utilizando el software EDAX Génesis. El ensayo se realiza sobre cada una de las interfases para determinar la composición y los elementos químicos que intervienen, Figuras VII.8 a VII.11.

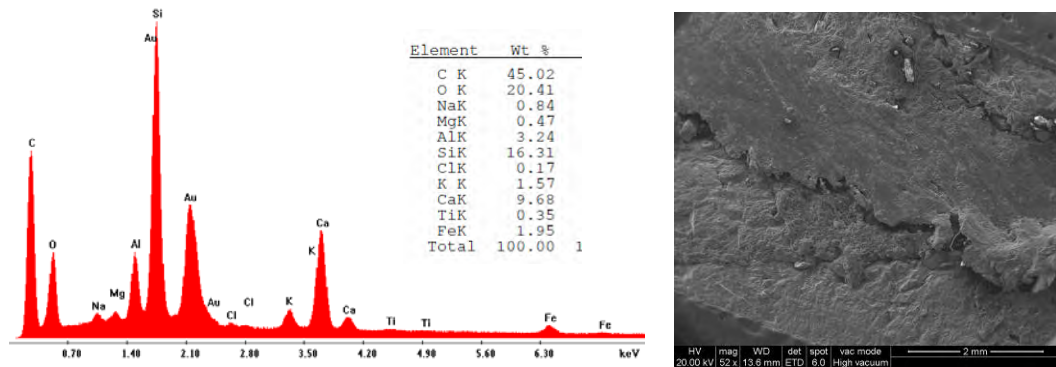


Figura VII.8 EDAX completo hormigón, FM PP y mezcla asfáltica (correspondiente a la Figura VII.2)

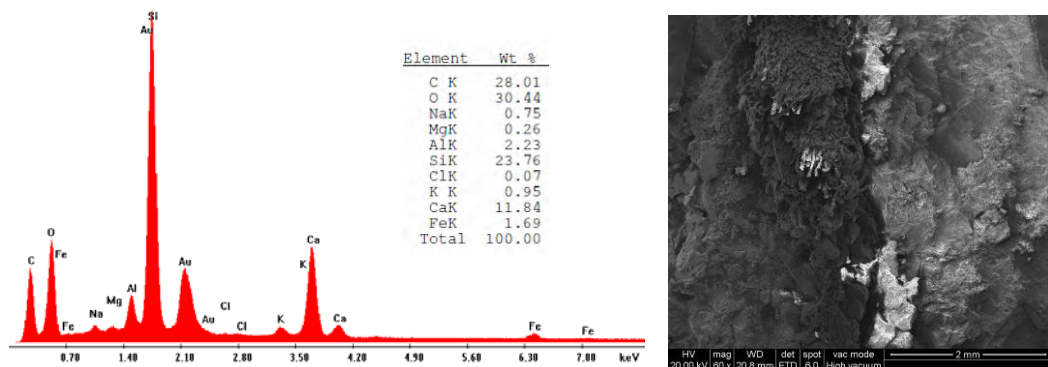


Figura VII.9 EDAX completo hormigón, HSK PET y mezcla asfáltica (correspondiente a la Figura VII.3)

En los casos donde se coloca un geosintético sobre una losa de hormigón, compuesto por una membrana asfáltica, Figura VII.8, el peso en masa de C y O indica mayor presencia de estos elementos. Esto se hace más evidente cuando el mismo material se introduce entre capas asfálticas, Figura VII.10.

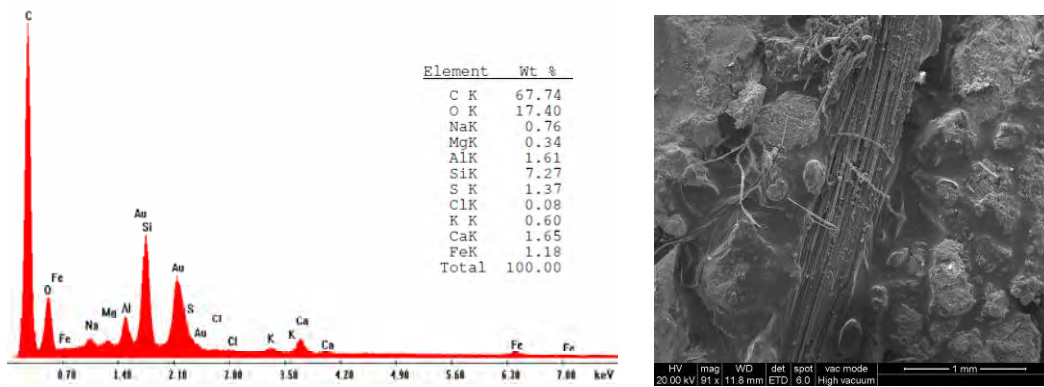
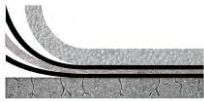


Figura VII.10 EDAX completo mezcla asfáltica, FM PP y mezcla asfáltica (correspondiente a la Figura VII.4)

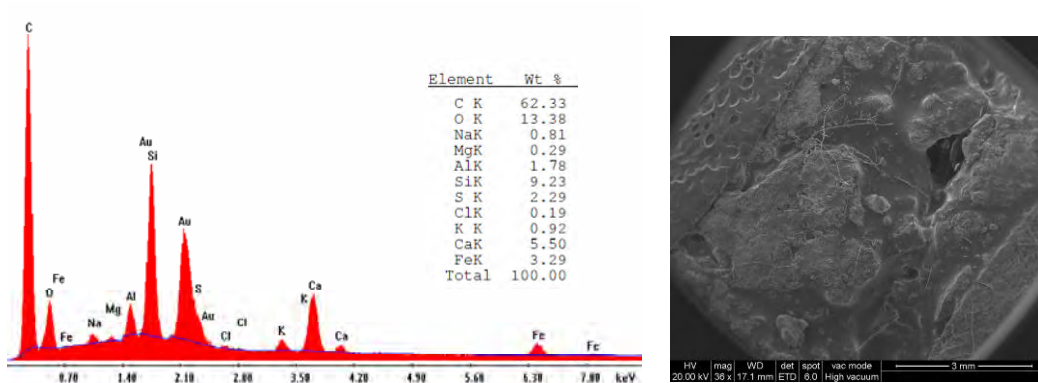
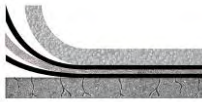


Figura VII.11 EDAX completo mezcla asfáltica, HSK PET y mezcla asfáltica (correspondiente a la Figura VII.5)

Se realiza EDAX sobre la Matrix de referencia (losa de hormigón, emulsión, capa asfáltica), con objeto de comparar posibles cambios en la interfase con aquella que incorpora un material a partir de fibras sintéticas. La Figura VII.12 muestra la citada interfase.



Figura VII.12 Interfase hormigón + emulsión + mezcla asfáltica



En la interfase donde no interviene un material geosintético se puede observar el pico de Ca que corresponde al cemento hidratado, y el pico de Si que corresponde al agregado granítico, Figura VII.13. La presencia del pico de C hace referencia a la emulsión asfáltica utilizada para ligar las capas.

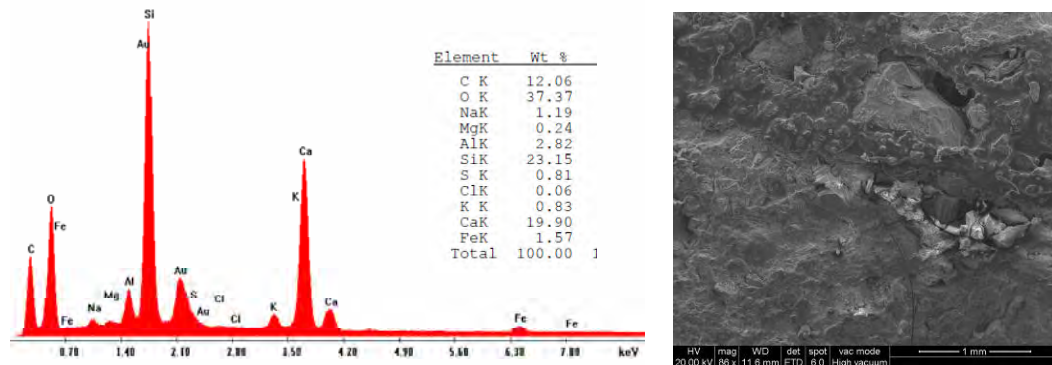


Figura VII.13 EDAX completo hormigón y mezcla asfáltica

Los espectros indican los picos de Au correspondiente al metalizado realizado sobre las muestras, el cual se elimina para la cuantificación de los elementos presentes.

La Figura VII.14 muestra el equipo utilizado para las determinaciones EDAX de la UNLP (Universidad Nacional de La Plata).



Figura VII.14 Equipo utilizado para las determinaciones EDAX



VII.2. REFLEJO DE FISURAS CON Y SIN LA INTERPOSICIÓN DE GRILLAS POLIMÉRICAS

Existen varios equipos de ensayos diseñados a fin de valorar la propagación de una fisura; la mayoría se basan en aplicar cargas mediante sollicitaciones dinámicas. Se describen y desarrollan aquéllos implementados en la presente tesis.

VII.2.1 Modelo de reflejo de fisuras con equipo de rueda de carga Wheel Tracking Test (WTT)

Para certificar el comportamiento de los materiales geosintéticos ante el fenómeno de reflejo de fisura, se implementa el ensayo de sollicitación dinámica mediante el acondicionamiento del equipo de rueda de carga, Wheel Tracking Test, Figura VII.15.

El ensayo de Wheel Tracking Test (WTT) surgió como una metodología para estudiar las deformaciones plásticas (ahuellamiento) en pavimentos asfálticos; el mismo se caracteriza por aplicar una carga dinámica a través de una rueda, la que simula las condiciones de tránsito, sobre una probeta prismática de 300x300 mm y 50 mm de espesor. El ensayo registra las deformaciones verticales sufridas por la mezcla a lo largo de 10.000 ciclos de carga; dicho ensayo se efectúa a 60 °C.

La carga de la rueda es de 700 Newton (carga por eje reglamentaria en Argentina, 10,5 Tn), la cual se aplica con una frecuencia de movimiento de 26,5 ciclos por minuto. Las características de la rueda están dadas por su diámetro 200 mm, su ancho 50 mm, el espesor de la cubierta 20 mm y la dureza de la cubierta 80 IRHD (International Rubber Hardness Degrees). Bajo estas características cumple con el Método BS EN 12697-22.



Figura VII.15 Equipo de Wheel Tracking Test empleado

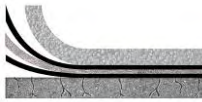
Dada la tipología del ensayo dinámico, junto con la manera de aplicar las cargas a través de una rueda, constituye un modelo normalizado de cargas dinámicas sobre la estructura del pavimento. Se decide utilizar dicho equipamiento para evaluar las cualidades que puede llegar a brindar un material geosintético como retardador de fisuras reflejas.

VII.2.1.1 Confección de probetas

El hormigón de base de los sistemas fue dosificado ad-hoc para el trabajo de investigación, el cual respeta la fórmula presentada en la Tabla VII.1.

Tabla VII.1 Dosificación del hormigón

Componentes	Peso (kg/m ³)	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	Arena	Peso (kg)
Agua	163	1,00	0,163		
Cemento CPC 40	365	3,06	0,119		
A. Grueso 6:12	855	2,67	0,320		
Agregado fino	1002	2,65	0,038	Arena gruesa	702
Aire			0,015	Arena fina	301
Superfluidificante	4,9	1,15	0,004		
a/c	0,45		1,000		
MRm (MPa) =	4,5	Resistencia media a la flexión			
K =	0,75	$f'_{cm} = (MRm / K)^2$			
f'cm (MPa) =	36	Resistencia media a compresión			



Para las experiencias se confeccionan series de tres (3) probetas por cada sistema a ser estudiado. Los ensayos se ejecutan a dos temperaturas, 25 °C y 60 °C. Las dimensiones de la probeta varían de acuerdo a la temperatura adoptada en la ejecución del ensayo.

Para los ensayos a 60 °C (*etapa 1*) las dimensiones de la probeta son 300 mm por 300 mm y 50 mm de espesor de mezcla asfáltica, dejando la cara frontal descubierta, mientras que para los ensayos a 25 °C (*etapa 2*) las dimensiones de la probeta son 300 mm de largo por 100 mm de ancho y 50 mm de espesor de mezcla asfáltica, dejando la cara frontal y fondo descubiertas.

Las probetas son confeccionadas de la siguiente manera: dos placas de hormigón separadas 0,5 cm, cuyo espacio se completa con telgopor o sellador con objeto de simular una junta real deteriorada del pavimento de hormigón o una fisura existente que tiende a su propagación en el plano vertical, Figura VII.16.



Figura VII.16 Placas de hormigón, sellado de junta

Como control se confeccionan probetas de hormigón cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura las cuales arrojan una resistencia media a compresión a 28 días de 42,4 MPa, constatándose que se alcanzan resistencias típicas de hormigones para pavimentación.

Los ensayos a compresión se realizan con el equipo Controls-Pilot 4 del Centro de Investigaciones Viales (LEMaC), Figura VII.17.

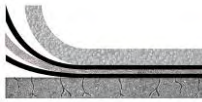


Figura VII.17 Moldeo de probetas y losas (izquierda); ensayo a compresión (derecha)

Sobre las losas de hormigón, con la junta intermedia, se ejecuta el riego con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS (ECRR-M) de acuerdo a la circunstancia de obra; según los datos de la bibliografía y la recomendación del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad (bajo el título de tratamiento bituminoso superficial de sellado: Sección D.III), se selecciona una dotación de 0,9 l/m² debido a que el estado superficial de las probetas es bastante regular a diferencia de lo que sucede en obra (puede llegar a ser de 1,5 l/m² la dotación, dependiendo del tipo de emulsión y las condiciones que presente el pavimento).

Una vez curada la emulsión (40 minutos aproximadamente bajo las condiciones de laboratorio) se coloca, sobre la película formada, el material geosintético, dando una leve compactación (cuidando que no queden arrugas) de la mezcla asfáltica convencional en caliente del tipo CAC D20 a 160 °C, Figura VII.18.



Figura VII.18 Ejecución del riego y colocación del material geosintético



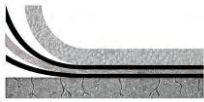
El material utilizado como riego asfáltico (ECRR-M) es brindado por una importante empresa del país, por lo que se cuenta con cantidad suficiente y en los tiempos necesarios en que se realizan los ensayos, con el fin de evitar el vencimiento (asentamiento de la parte polimérica) de la misma. Sobre esta emulsión se realizan los ensayos de caracterización; los parámetros obtenidos se presentan en la Tabla VII.2.

Tabla VII.2 Caracterización de la emulsión empleada

Ensayo	Unidad	Norma IRAM	Resultado
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	SSF	6721	33,7
Residuo asfáltico por destilación	g/100g	6719	65,3
Asentamiento	g/100g	6716	1,7
Contenido de agua	g/100g	6719	37,5
Carga de partículas	-	6690	positiva
Residuo sobre tamiz IRAM 850 mm	g/100g	6717	0,06
Ensayos sobre el residuo de destilación			
Penetración del residuo	0,1 mm	6576	90
Ductilidad	cm	6579	>100

En el caso del geosintético compuesto por una membrana polimérica y un geotextil tejido en polipropileno (FM PP), antes de la colocación de la capa asfáltica, se realiza un nuevo riego de liga; luego del curado (30 min aproximadamente) en condiciones de laboratorio, se compacta la mezcla asfáltica convencional tipo CAC D20.

El procedimiento se realiza de la misma manera para el material GNT PET 150 g. con la salvedad de que se coloca el 80% del riego de liga sobre la losa de hormigón, se coloca el material y después se aplica el 20% restante de emulsión sobre el material para ligarlo con la capa asfáltica superior. La compactación de la mezcla asfáltica, según la práctica habitual en confección de probetas de Wheel Tracking Test. Los moldes armados con las losas de hormigón se colocan en una superficie plana; el cálculo de la cantidad de muestra asfáltica a compactar sobre las losas y el riego de emulsión asfáltica se realiza de la siguiente manera:



Pmuestra = Vol. del molde x Densidad Marshall de la mezcla

$$Pmuestra = 2,347 \text{ g/cm}^3 \times 4500 \text{ cm}^3 = 10562 \text{ g}$$

$$\text{Vol. del molde} = 30 \times 30 \times 5 \text{ cm} = 4500 \text{ cm}^3$$

$$\text{Densidad Marshall de la mezcla} = 2,347 \text{ g/cm}^3 \text{ (Tabla V.2 Capítulo VI)}$$

Temperatura de moldeo = 165 °C en baño de aceite

Temperatura de compactación = 160 °C

Para el cálculo de la cantidad de emulsión asfáltica a colocar sobre la base de hormigón es necesario tener en cuenta el porcentaje de residuo.

Cantidad = Dotación según especificación x área de la probeta

$$\text{Dotación sobre el hormigón según especificación técnica} = 0,9 \text{ l/m}^2$$

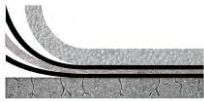
$$\text{Área de la probeta} = 0,3 \times 0,3 \text{ m} = 0,09 \text{ m}^2$$

Residuo de la emulsión = 65,3% (Tabla IV.11 Capítulo IV)

Cantidad considerando el % de residuo = 124,0 g de emulsión ECRR–M

Procediendo al moldeo, se utiliza un martillo percutor marca Metabo programado a máxima velocidad (velocidad=7). Se coloca la mezcla asfáltica a la temperatura de compactación (160 °C) y se procede a la compactación desde el centro de la probeta distribuyendo la mezcla hacia los bordes. Luego se coloca el martillo en uno de los bordes y se compacta formando una franja horizontal.

El tiempo de compactación se determina de acuerdo al tiempo necesario para compactar una mezcla asfáltica en caliente con 75 golpes por cara, el cual fue aproximadamente de 2 min 20 seg. Se toma este tiempo como límite inferior siendo el tiempo máximo de compactación cuando se observa la superficie brillar como resultado de la afloración del asfalto.



Se deja enfriar el conjunto durante 24 horas procediendo a ensayarlo con el equipo de Wheel Tracking Test acondicionando la muestra durante 4 horas a 60 °C o 25 °C.

Para los ensayos a 25 °C (*etapa 2*), se corta la probeta moldeada de 300x300 mm y 50 mm de espesor de mezcla asfáltica en tres para obtener las muestras a ensayar, Figura VII.19.

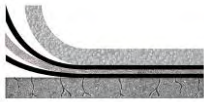


Figura VII.19 Corte de la probeta

La mezcla asfáltica utilizada como capa de refuerzo, diseñada en previamente en laboratorio (Tabla V.2, Capítulo VI) se obtiene de una de las empresas que produce diariamente la mezcla para las obras de pavimentación de la Municipalidad de La Plata, la cual cumple con las exigencias del diseño. De esta manera se cuenta con cantidad suficiente para el moldeo de la parte experimental y el control rutinario de la mezcla mediante técnica de cartas de control, permitiendo mantenerla uniforme para la confección de las probetas.

Para el Sistema 2 y Sistema 3 donde se considera una capa de arena asfalto, la misma es dosificada en laboratorio siguiendo la norma INV-07 artículo 432-07 del Instituto Nacional de Vías de Colombia, obteniéndose los parámetros presentados en la Tabla VII.3.

La Figura VII.20 muestra la curva granulométrica de la mezcla diseñada. Por su parte las Figuras VII.21 y VII.22 muestran como se coloca el material GR FV y HSK PET mientras que la Figura VII.23 permite



visualizar el riego sobre el material FM PP y la compactación de la mezcla asfáltica.

Tabla VII.3 Parámetros de la arena asfalto empleada

	Parámetro	Valor
Ensayo Marshall VN-E 9	Nº golpes por cara	50
	Estabilidad (kg)	739
	Fluencia (mm)	3,8
	Relación Estabilidad-Fluencia (kg/cm)	1945
	Porcentaje de Vacíos en mezcla (%)	5,4
	Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral (VAM)	-
	Porcentaje Relación Betún-Vacíos (%)	-
	Densidad Marshall (g/cm ³)	2,287
	Densidad Rice (g/cm ³)	2,417
	Porcentaje de Cemento Asfáltico (%)	6,5

La misma se compone por un 97,5% de arena 0-6 y 2,5% de cal, más asfalto CA-20.

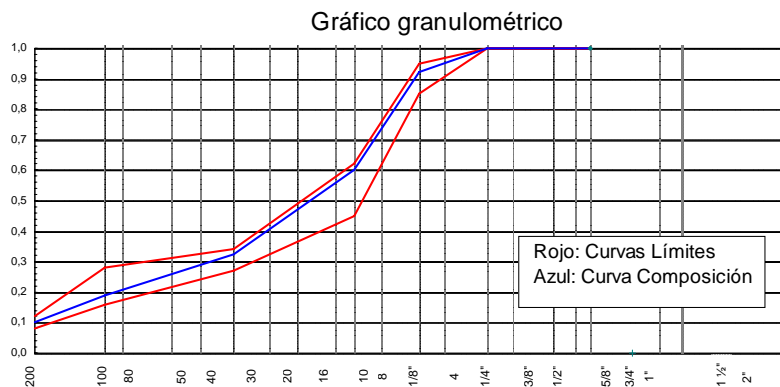


Figura VII.20 Curva granulométrica de la mezcla diseñada



Figura VII.21 Colocación GR FV



Figura VII.22 Colocación HSK PET

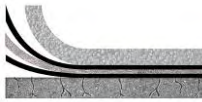


Figura VII.23 Riego sobre el material FM PP (izquierda); compactación de la mezcla asfáltica (derecha)

VII.2.1.2 Sistema de apoyo

Las probetas, confeccionadas con los procedimientos descritos con anterioridad, se colocan sobre el sistema de apoyo materializado por varillas metálicas de acero liso de 8 mm de diámetro en los extremos, colocándose bajo cada losa un lecho de goma flexible, Figura VII.24. Mediante este apoyo se representa la capacidad de deformación y trabajo de la junta ante las sollicitaciones del ensayo, que simulan la carga dinámica del tránsito. Esta metodología adoptada surge de la bibliografía consultada y de haber realizado experiencias previas con distinta configuraciones de apoyo, siendo ésta la que representa mejor las condiciones de sollicitación en concordancia con la junta.

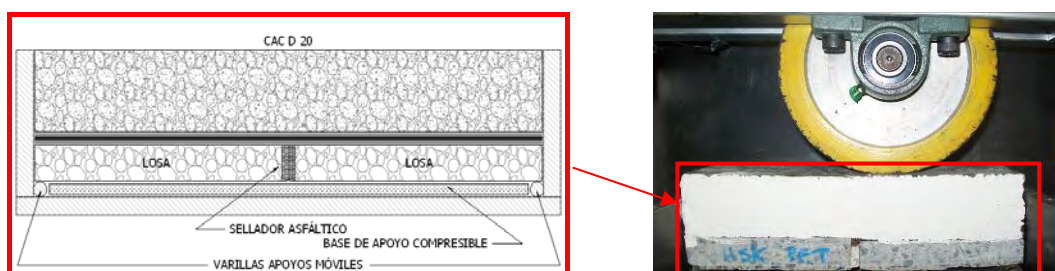
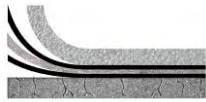


Figura VII.24 Sistema de apoyo: esquema (izquierda, sistema materializado (derecha)

VII.2.1.3 Procedimiento de ensayo

Los ensayos son ejecutados a dos temperaturas.



VII.2.1.3.1 Etapa 1, 60 °C

Cada probeta, colocada en el sistema de apoyo descrito, se climatiza en la cámara del equipo de Wheel Tracking Test a 60 °C por un plazo de 4 horas. Una vez transcurrido el proceso de acondicionamiento térmico se procede a ejecutar la aplicación de los ciclos de carga hasta que la fisura se propague al nivel superficial de la capa de refuerzo de mezcla asfáltica o hasta cumplir los 10.000 ciclos de carga que dura el ensayo.

Se evalúa el tiempo en que se produce la fisura sobre la capa de refuerzo asfáltico, registrándose distintos estadios de su evolución, tomándose fotografías y midiendo la altura y apertura de la fisura.

Para visualizar la aparición de las fisuras y su evolución, se pinta la cara expuesta de mezcla asfáltica con pintura a la cal, de tal manera que el color blanco sea un contraste en el desarrollo de las fisuras.

VII.2.1.3.2 Etapa 2, 25 °C

Debido a que el acondicionamiento de la probeta durante 4 horas a 60 °C, y la ejecución del ensayo a esta misma temperatura produce el cierre de la fisura, y la capa se deforma al fluir la mezcla asfáltica como consecuencia de las condiciones de borde (cara expuesta), por ello se decide realizar los ensayos a una temperatura de 25 °C.

VII.2.1.4 Resultados sin interposición de geosintético

VII.2.1.4.1 Etapa 1, 60 °C

La Tabla VII.4 permite observar que la arena asfalto se fisura en un tiempo más corto, correspondiente a 53 ciclos, que la mezcla asfáltica (132 ciclos) y el tiempo que tarda en fisurarse completamente la capa de arena asfalto resulta mayor (120 minutos) correspondiente a 3174 ciclos; esto se debe a que la capa de arena asfalto agrega mayor recorrido a la fisura (mayor espesor) a la capa total del sistema.

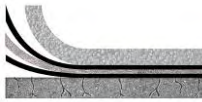


Tabla VII.4 Resultados de ensayos WTT a 60 °C

Material	Tiempo de aparición de la fisura (min.)	Cantidad de ciclos (n°)	Tiempo de propagación (min.)	Cantidad de ciclos (n°)
Sistema 1 (Referencia)	5	132	40	1058
Sistema 2 (Arena asfalto)	2	53	120	3174

La Figura VII.25 presenta la secuencia fotográfica de uno de los ensayos representativos de la evolución de la fisura para el Sistema 1.

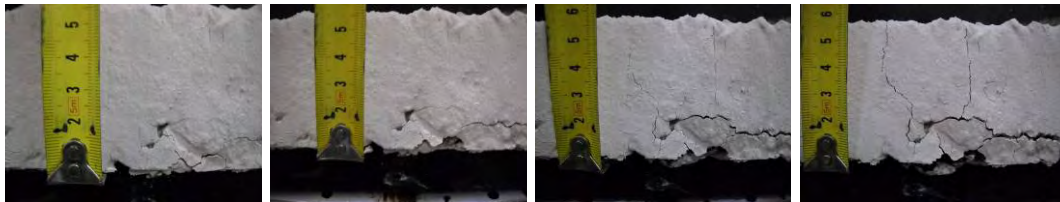


Figura a: Minuto 5
Ciclo: 132
h_{fisura} = 5 mm

Figura b: Minuto 20
Ciclo: 528
h_{fisura} = 17 mm

Figura c: Minuto 25
Ciclo: 661
h_{fisura} = 30 mm

Figura d: Minuto 40
Ciclo: 1058
h_{fisura} = 50 mm

Figura VII.25 Evolución de la fisura a 60 °C para el Sistema 1

La evolución de las fisuras se realiza tanto en sentido vertical como longitudinal, registrándose la apertura de las mismas. Las mediciones de amplitud para este ensayo se realizan mediante lupa, Tabla VII.5.

Tabla VII.5 Amplitud de fisuras al finalizar el ensayo

Fisura 1	Amplitud en la parte superior 0,1 mm
Fisura 1	Amplitud en la parte inferior 0,5 mm
Fisura 2	Amplitud en la parte superior 0,2 mm
Fisura 2	Amplitud en la parte inferior 0,3 mm

Para todos los ensayos, en promedio, la amplitud de la abertura de fisuras en la parte superior se presenta entre 0,1 a 0,2 mm mientras que en la parte inferior la apertura de las fisuras se encuentra entre 0,3 y 0,5 mm. Los valores de apertura de las fisuras varían de acuerdo a la deformación



sufrida por la mezcla asfáltica como consecuencia de la temperatura de ensayo, Figura VII.26.



Figura VII.26 Seguimiento del progreso de las fisuras

Una consideración importante observada en algunos ensayos, es el desplazamiento lateral de la capa de refuerzo, Figura VII.27, como consecuencia de las condiciones de borde; aplicación de la carga, cara frontal sin confinamiento y temperatura de ensayo de 60 °C.

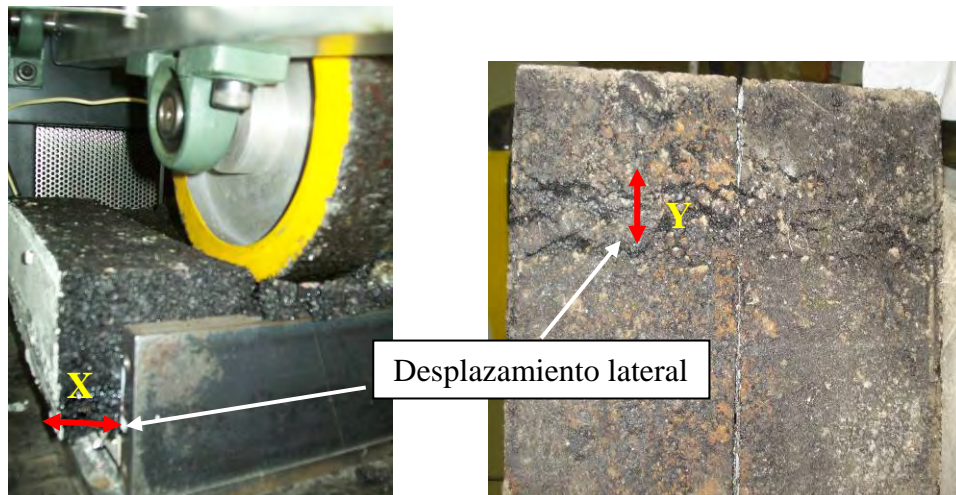
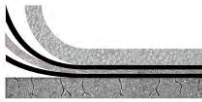


Figura VII.27 Desplazamiento sufrido por la probeta para el Sistema 1: base de hormigón (izquierda) y base asfáltica (derecha)

Los sistemas que consideran materiales geosintéticos, tanto en bases asfálticas como en bases de hormigón y a la temperatura de 60 °C, el problema no se evidencia, por lo que una primera conclusión sobre el uso de los materiales es su beneficio ante el potencial ahuellamiento que



sufren los pavimentos asfálticos que no tienen confinamiento lateral, Figura VII.28.

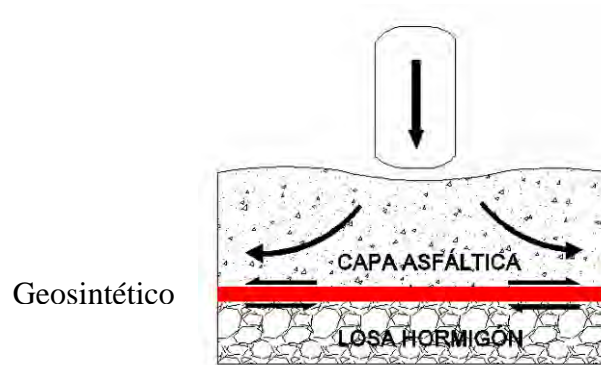


Figura VII.28 Aporte del geosintético al ahuellamiento

VII.2.1.4.1.1 Curvas de ahuellamiento sobre base de hormigón a 60 °C

Se realiza la medición de las deformaciones verticales (ahuellamiento) de las probetas a 60 °C, con y sin la interposición de un material geosintético, sobre una base de hormigón. La Figura VII.29 muestra las curvas de ahuellamiento representativas de un ensayo.

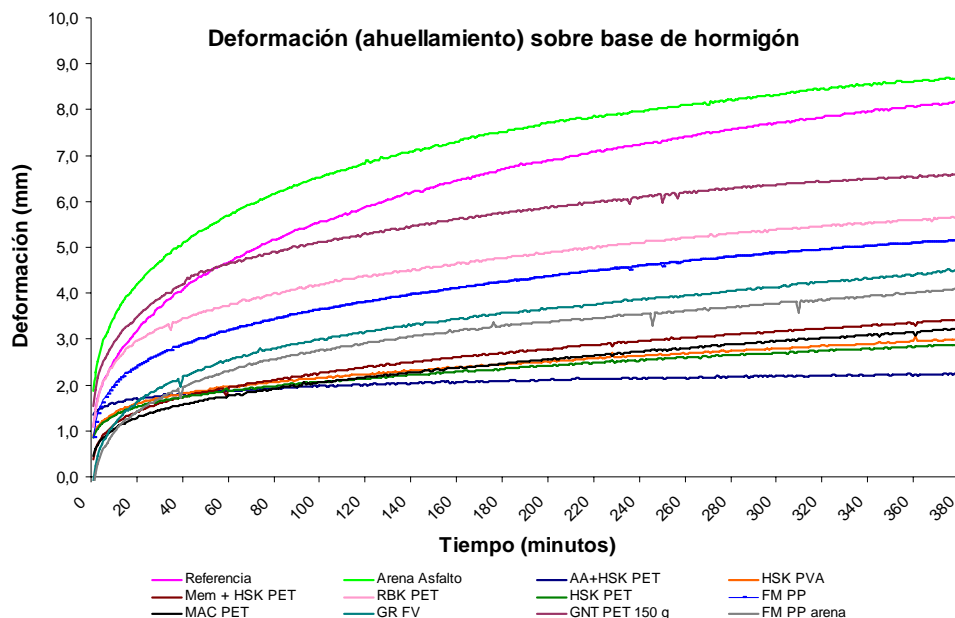


Figura VII.29 Curvas de ahuellamiento sobre losas de hormigón

La deformación producida por la rueda de carga disminuye cuando se utiliza un material geosintético, Figuras VII.30 a la VII.37.

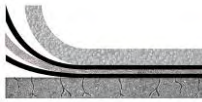


Figura VII.30 Arena Asfalto



Figura VII.31 Referencia

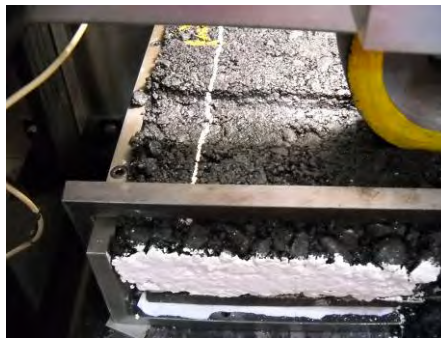


Figura VII.32 MAC PET



Figura VII.33 AA+HSK PET



Figura VII.34 HSK PET

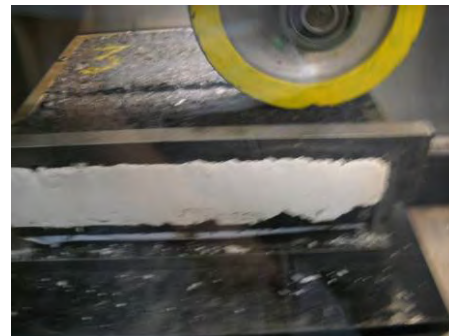


Figura VII.35 GNT PET 150 g



Figura VII.36 RBK PET



Figura VII.37 FM PP arena

La Figura VII.38 muestra el gráfico emitido por el software de ensayo.

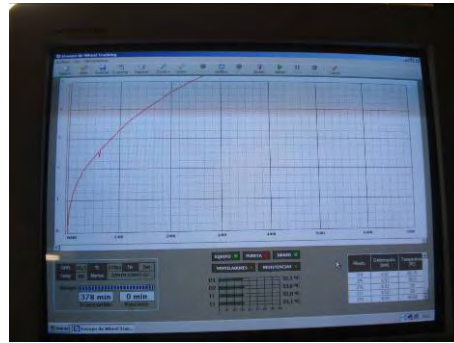
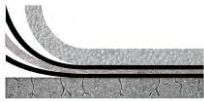


Figura VII.38 Curva ahuellamiento para el Sistema 11, GNT PET 150 g.

Se concluye para este ensayo que la interposición de un material geosintético mejora la resistencia de la carpeta asfáltica al ahuellamiento a través de la distribución de tensiones, mediante un anclaje mecánico producido entre el material geosintético y la masa asfáltica.

VII.2.1.4.2 Etapa 2, 25 °C

La Tabla VII.6 evidencia que la fisura se produce en un tiempo mayor al correspondiente a los ensayos realizados a 60 °C; esto posiblemente se debe al ahuellamiento sufrido en los ensayos a 60 °C, lo cual favorece a la formación de la fisura.

Tabla VII.6 Resultados de ensayos WTT a 25 °C

Material	Tiempo de aparición de la fisura (min.)	Cantidad de ciclos (n°)	Tiempo de propagación (min.)	Cantidad de ciclos (n°)
Sistema 1 (Referencia)	10	264	365	9656
Sistema 2 (Arena asfalto)	5	132	488	12910

VII.2.1.5 Ensayos con interposición de geosintético

VII.2.1.5.1 Etapa 1, 60 °C



La fisura no propaga a la superficie transcurridos los 10000 ciclos de carga, dando por finalizado el ensayo por los efectos que la temperatura produce, la cual no permite visualizar efectivamente el progreso de la fisura.

Se describe en la Tabla VII.7 la cantidad de ciclos para la cual la fisura se genera y la altura que alcanza transcurridos los 10000 ciclos.

Tabla VII.7 Resultados de ensayos WTT a 60 °C

Material	Tiempo de aparición de la fisura (min.)	Cantidad de ciclos (n°)	h _{fisura} final (mm)	Cantidad de ciclos (n°)
Sistema 3 (Arena asfalto+HSK PET)	2	53	25	10000
Sistema 4 (HSK PET)	57	1510	7	10000
Sistema 5 (MAC PET)	47	1243	10	10000
Sistema 6 (RBK PET)	13	343	17	10000
Sistema 7 (HSK PVA)	60	1587	7	10000
Sistema 8 (FM PP)	15	396	15	10000
Sistema 9 (GR FV)	40	1058	10	10000
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	50	1323	9	10000
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	10	264	16	10000
Sistema 12 (FM PP arena)	32	847	12	10000

Nota: los resultados de h_{fisura} (altura que alcanza la fisura en su propagación) son considerados sobre la capa asfáltica colocada como refuerzo, para el Sistema 3 los 25 mm determinados corresponden a los 20 mm de la arena asfalto y 5 cm sobre la capa asfáltica.

Se confeccionan los gráficos del seguimiento de la evolución de las fisuras en función de la cantidad de ciclos, los cuales permiten comprender el comportamiento de la fisura conforme incrementan los ciclos de carga, Figura VII.39.

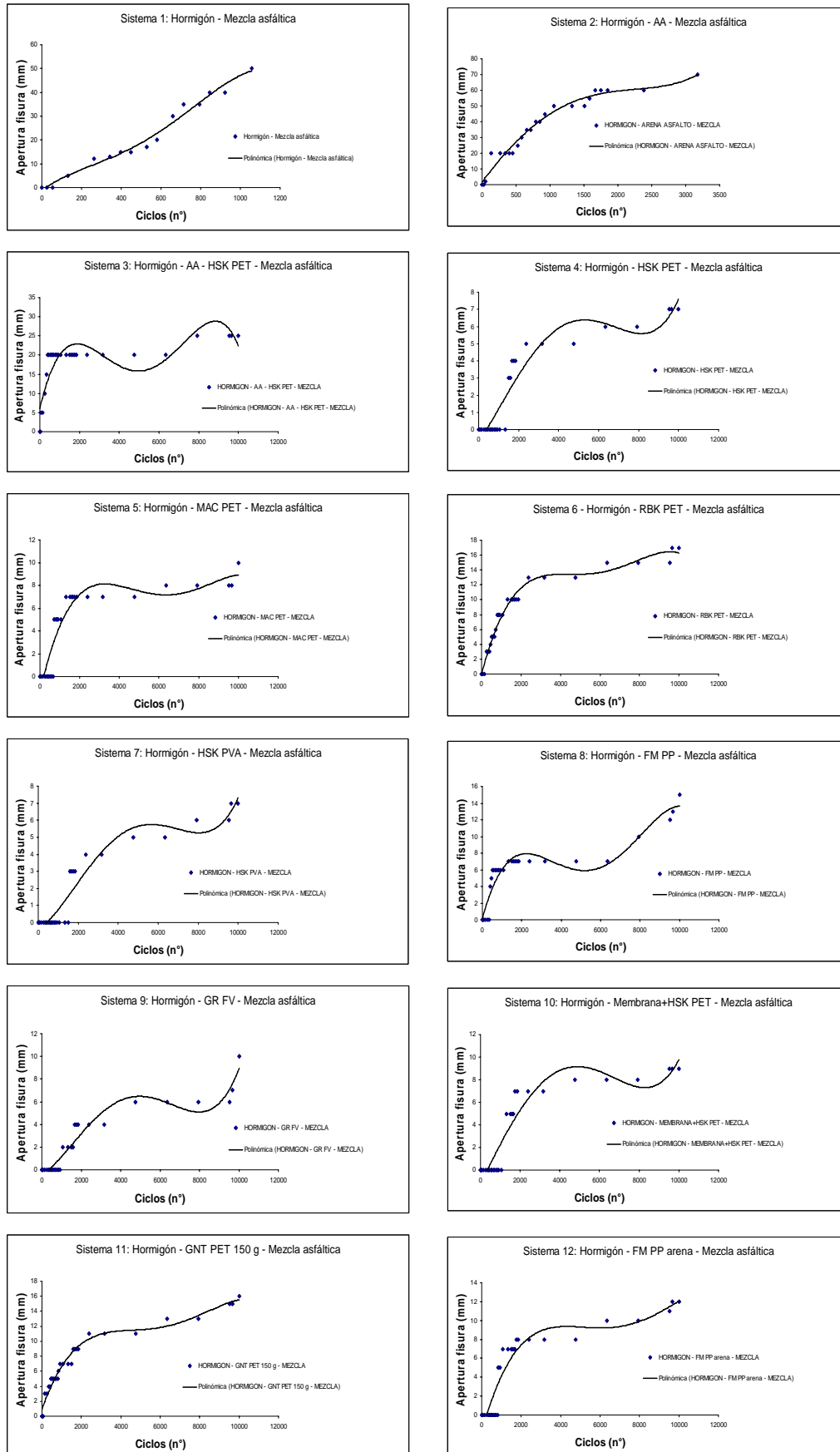
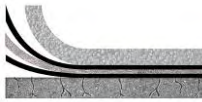


Figura VII.39 Apertura de fisura en función de los ciclos de carga



Se toma una línea de tendencia polinómica debido a la fluctuación de los datos, donde se tienen varios puntos máximos. Se advierte que no es posible un ajuste satisfactorio con una única función sencilla. Esta curva se presta, más bien, a un ajuste por tramos.

Para el Sistema 1 de referencia se observa que la fisura sostiene un crecimiento progresivo hasta llegar a la superficie de la capa superior.

Para el Sistema 2 la fisura atraviesa rápidamente los 20 mm. de la capa de arena asfalto, disminuyendo la tasa de crecimiento sobre la capa asfáltica con evolución paulatina.

Para el Sistema 3 se aprecia como rápidamente alcanza los 20 mm., al igual que en el Sistema 2, manifestando la detención de su crecimiento al alcanzar la interfase con el material HSK PET, llegando a una altura de fisura (h_{fisura}) de 5 mm. sobre la capa asfáltica.

Se puede observar que los materiales geosintéticos trabajan efectivamente, donde la fisura alcanza una altura de 8,5 mm en promedio sobre la capa asfáltica, cuando se utilizan materiales de malla abierta, y una altura de 15 mm. cuando se consideran materiales que cubren toda la superficie.

Las gráficas de ciclos versus apertura de fisura permiten evidenciar el trabajo efectivo realizado por los materiales al presentar un escalón, materializado por una detención en la progresión de la fisura con el aumento de los ciclos de carga.

VII.2.1.5.2 Etapa 2, ensayo a 25 °C

La Tabla VII.8 incluye los resultados experimentales.

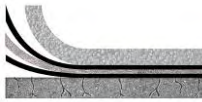


Tabla VII.8 Resultados de ensayos WTT a 25 °C

Material	Tiempo aparición de la fisura (min.)	Cantidad de ciclos (n°)	h fisura final (mm)	Cantidad de ciclos (n°)
Sistema 3 (Arena asfalto+HSK PET)	6	158	30	118460
Sistema 4 (HSK PET)	1296	34280	25	286350
Sistema 5 (MAC PET)	908	24020	35	256580
Sistema 6 (RBK PET)	95	2513	40	34280
Sistema 7 (HSK PVA)	1412	37350	35	316640
Sistema 8 (FM PP)	106	2804	40	41690
Sistema 9 (GR FV)	488	12910	30	146370
Sistema 10 (Membrana+HSK PET)	1109	29340	35	346660
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	90	2381	40	29340
Sistema 12 (FM PP arena)	180	4762	40	49260

Nota: los resultados de h fisura (altura que alcanza la fisura en su propagación) son considerados sobre la capa asfáltica colocada como refuerzo, para el Sistema 3 los 30 mm determinados corresponden a los 20 mm de la arena asfalto y 10 mm sobre la masa asfáltica.

La Figura VII.40 y Figura VII.41 presentan la secuencia fotográfica de los ensayos representativos de la evolución de las fisuras para los materiales geosintéticos FM PP y MAC PET.



Figura a:

Minuto 10

Ciclo: 264

h fisura = 0 mm

Figura b:

Minuto 360

Ciclo: 9523

h fisura = 15 mm

Figura c:

Minuto 488

Ciclo: 12910

h fisura = 20 mm

Figura d:

Minuto 1576

Ciclo: 41690

h fisura = 40 mm

Figura VII.40 Evolución de fisura para el material FM PP a 25 °C

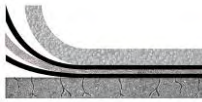


Figura a:	Figura b:	Figura c:	Figura d:
Minuto 1109	Minuto 3208	Minuto 4478	Minuto 8564
Ciclo: 29340	Ciclo: 84870	Ciclo: 118460	Ciclo: 226560
h fisura = 5 mm	h fisura = 15 mm	h fisura = 20 mm	h fisura = 30 mm

Figura VII.41 Evolución de fisura para el material MAC PET a 25 °C

Se confeccionan los gráficos del seguimiento de la propagación de las fisuras en función de la cantidad de ciclos, Figura VII.42.

Se observa que para el Sistema 1 la fisura crece gradualmente sin presentar alteraciones en su avance.

Para el Sistema 2 la fisura crece rápidamente hasta alcanzar la interfase con la capa de mezcla asfáltica, manifestando un retardo hasta iniciarse la misma sobre la capa asfáltica. Una vez que se inicia sobre la capa asfáltica la fisura crece progresivamente con menor tasa de crecimiento hasta alcanzar los 60 mm (40 mm sobre la mezcla asfáltica), dando por finalizado el ensayo.

El Sistema 3 manifiesta en principio un comportamiento similar al Sistema 2, donde la fisura rápidamente alcanza la interfase donde se encuentra el material HSK PET. A partir de allí la fisura se detiene por el trabajo de costura realizado por el material, donde el mismo absorbe parte de la tensión producida en la extremidad de la fisura alcanzando los 59260 ciclos de carga, para luego seguir su camino hasta alcanzar 30 mm sobre la capa asfáltica, finalizando el ensayo por unión de micro fisuras generadas en la masa asfáltica a los 118460 ciclos.

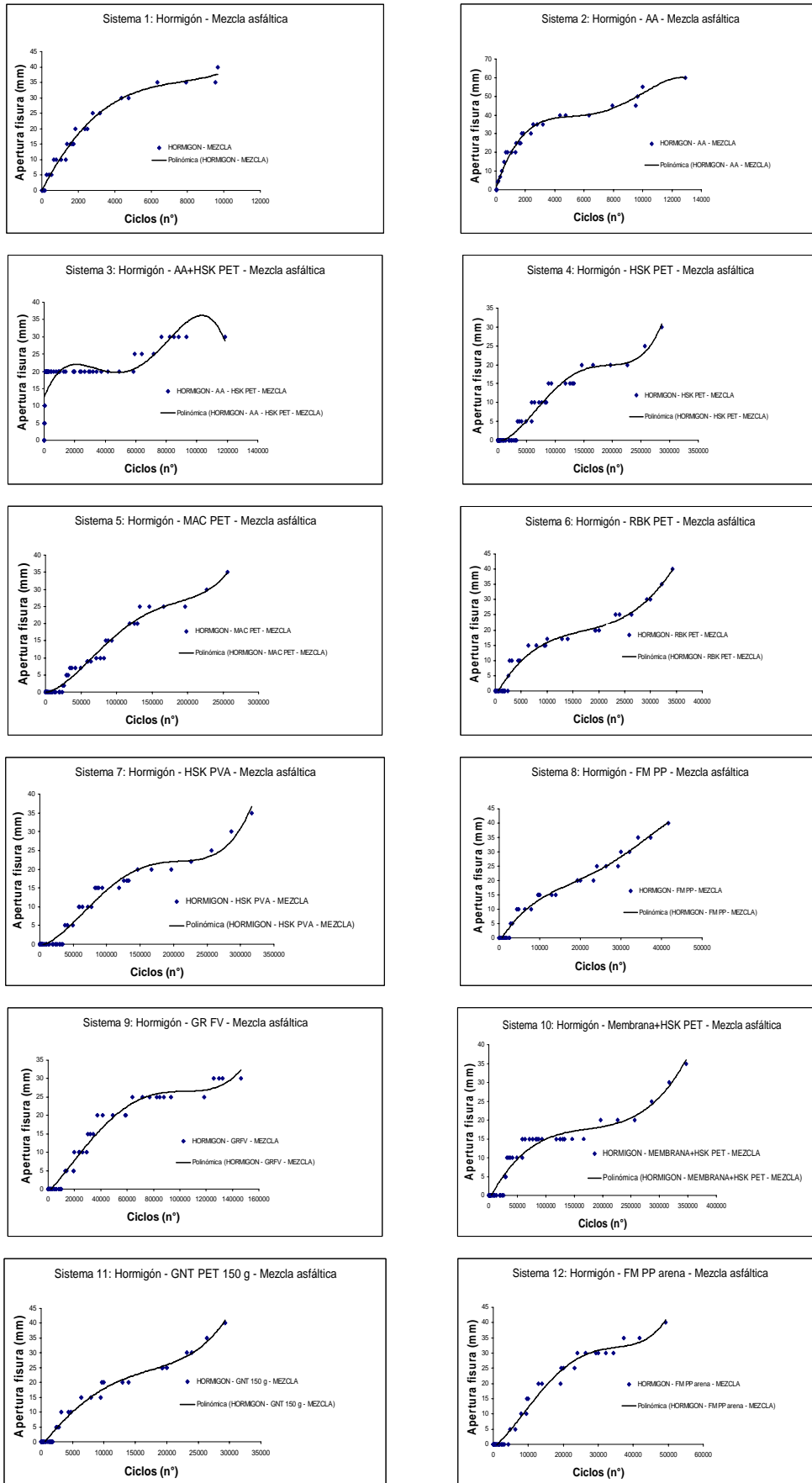
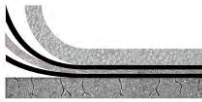
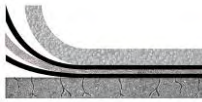


Figura VII.42 Curvas de apertura de fisura en función de los ciclos



Para los demás sistemas que consideran un material geosintético, los comportamientos difieren entre sí, evidenciándose en todos los casos un beneficio en comparación con el Sistema 1 de referencia.

VII.2.1.6 Análisis comparativo a diferente temperatura sobre base de hormigón

Como estudio comparativo, se confeccionan las curvas de evolución de fisuras (h_{fisura} = altura de fisura) versus número de ciclos para los ensayos efectuados a 60 °C y 25 °C.

Las Figuras VII.43 a VII.46 permiten visualizar el comportamiento de cada uno de los sistemas ante el retardo de las fisuras en crecimiento.

- Etapa 1, a 60 °C

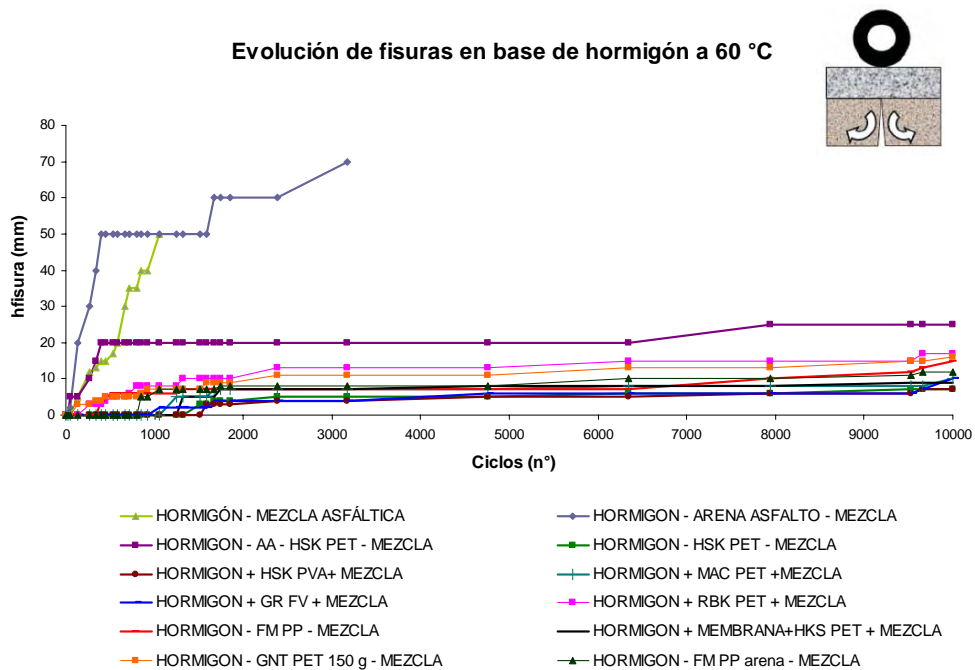
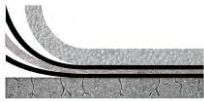


Figura VII.43 Curva de evolución de fisura para 60 °C



Evolución de fisuras en base de hormigón a 60 °C

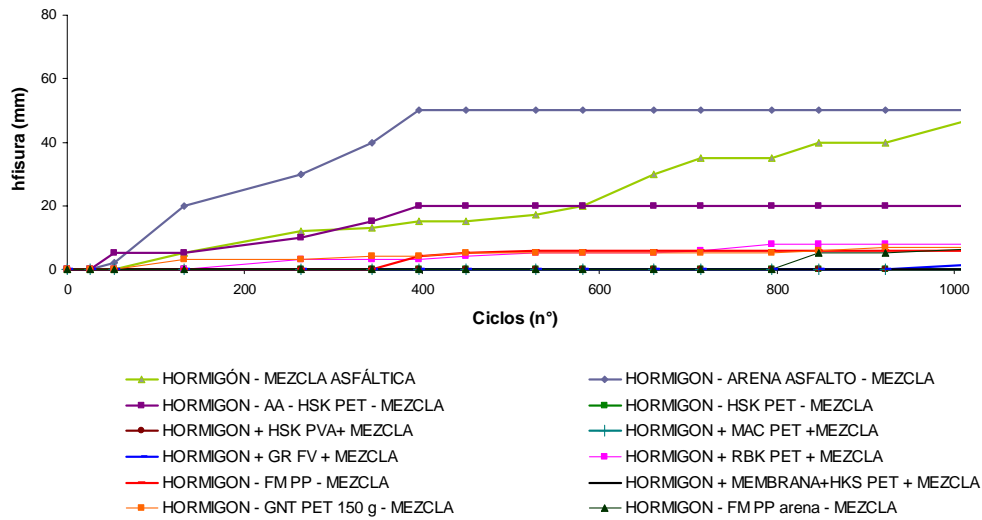


Figura VII.44 Evolución de fisura para los primeros 1000 ciclos a 60 °C

• **Etapa 2, a 25 °C**

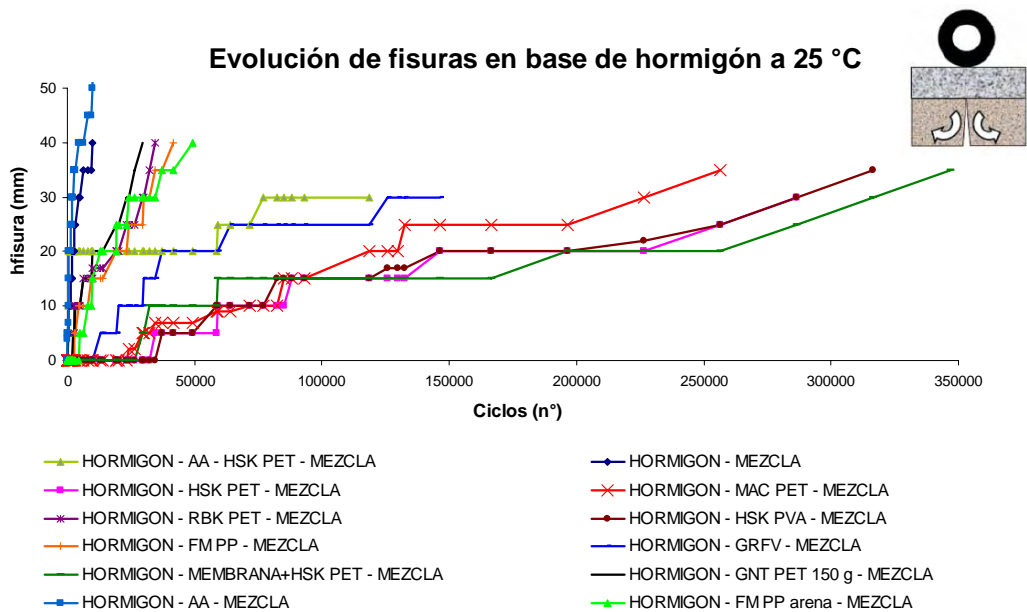
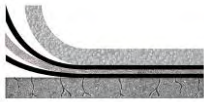


Figura VII.45 Curva de evolución de fisura para 25 °C

Nota: el ensayo se finaliza al alcanzar la fisura los 40 mm o cuando por unión de micro fisuras llega a la superficie de la capa de refuerzo.



Evolución de fisuras en base de hormigón a 25 °C

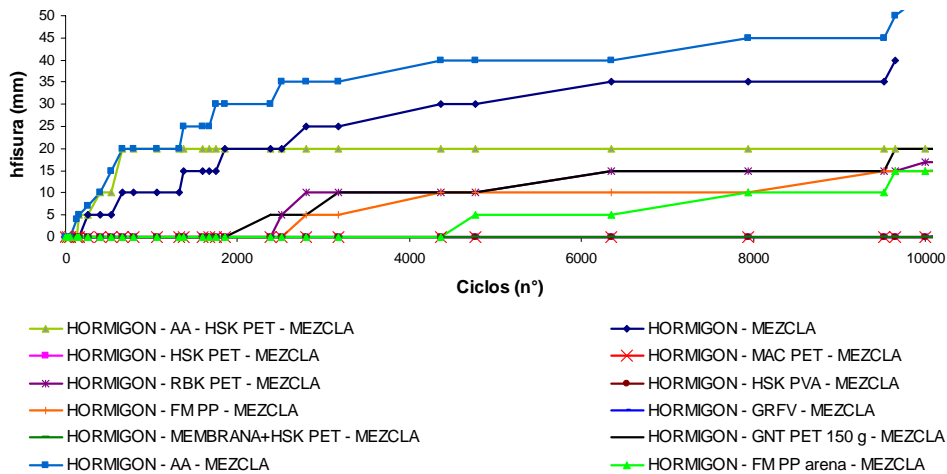


Figura VII.46 Evolución de fisura para los primeros 10000 ciclos a 25 °C

Se puede observar que en el Sistema 1 la fisura crece sin restricción alguna para ambas temperaturas, iniciándose sobre la capa asfáltica pasados los 132 ciclos cuando se considera el ensayo a 60 °C, mientras que a 25 °C los ciclos necesarios para que se inicie son 264.

Para el Sistema 2, donde se considera una capa de arena asfalto de 20 mm de espesor, la fisura crece más rápido cuando el ensayo se ejecuta a 60 °C, siendo necesarios 3174 ciclos para fisurar totalmente la probeta, mientras que a 25 °C son necesarios 12910 ciclos.

La Tabla VII.9 presenta el factor de efectividad, para el ensayo a 25 °C, que los materiales aportan cuando se introducen entre capas de un pavimento con el fin de retardar la fisuración refleja.

Para el ensayo de 60 °C el factor de efectividad fue difícil de determinar.

Se concluye de esta manera que los materiales geosintéticos aportan un notable beneficio, en mayor o menor medida dependiendo de su conformación, cuando se los interpone con objeto de prevenir la progresión de una fisura que tiende a crecer hacia la superficie, logrando



aumentar la vida útil de los pavimentos, siendo la temperatura de 60 °C la que menor beneficio ofrece, en todos los casos.

Tabla VII.9 Factor de efectividad (FEF) para ensayos a 25 °C

Material	Numero de ciclos (n°)	FEF (Nr/Nn)
Sistema 1 (Referencia)	9656	1,0
Sistema 2 (Arena asfalto)	12910	1,3
Sistema 3 (Arena asfalto + HSK PET)	118460	12,3
Sistema 4 (HSK PET)	286350	29,6
Sistema 5 (MAC PET)	256580	26,6
Sistema 6 (RBK PET)	34280	3,5
Sistema 7 (HSK PVA)	417930	32,8
Sistema 8 (FM PP)	41690	4,3
Sistema 9 (GR FV)	146370	15,2
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	316640	35,9
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	29340	3,0
Sistema 12 (FM PP arena)	49260	5,1

Nr: n° de ciclos que genera la falla en la probeta con material geosintético

Nn: n° de ciclos que genera la falla en la probeta sin material geosintético

VII.2.1.7 Ensayo a 60 °C, sobre una base asfáltica

Comparativamente se realizan ensayos para estudiar el reflejo de fisuras, considerando algunos de los sistemas propuestos, sobre una base asfáltica tipo CAC D20 pre-fisurada. La Tabla VII.10 presenta los resultados.

Al igual que para los ensayos realizados sobre una base de hormigón a 60 °C el ensayo se concluye pasados los 10000 ciclos de carga, debido a la deformación experimentada por la probeta, dificultando la determinación de la propagación de la fisura.

La Figura VII.47 permite ver el comportamiento de los materiales.

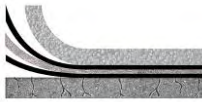


Tabla VII.10 Resultados de ensayos WTT a 60 °C sobre base asfáltica

Material	Tiempo de aparición de la fisura (min)	Cantidad de ciclos de fisura (n°)	h fisura final (mm)	Cantidad de ciclos de fisura (n°)
Sistema 13 (Referencia)	10	264	50	2381
Sistema 14 (Arena asfalto)	5	132	70	9524
Sistema 15 (HSK PET)	63	1666	4	10000
Sistema 16 (MAC PET)	40	1058	7	10000
Sistema 17 (FM PP)	25	661	10	10000
Sistema 18 (GR FV)	50	1323	5	10000

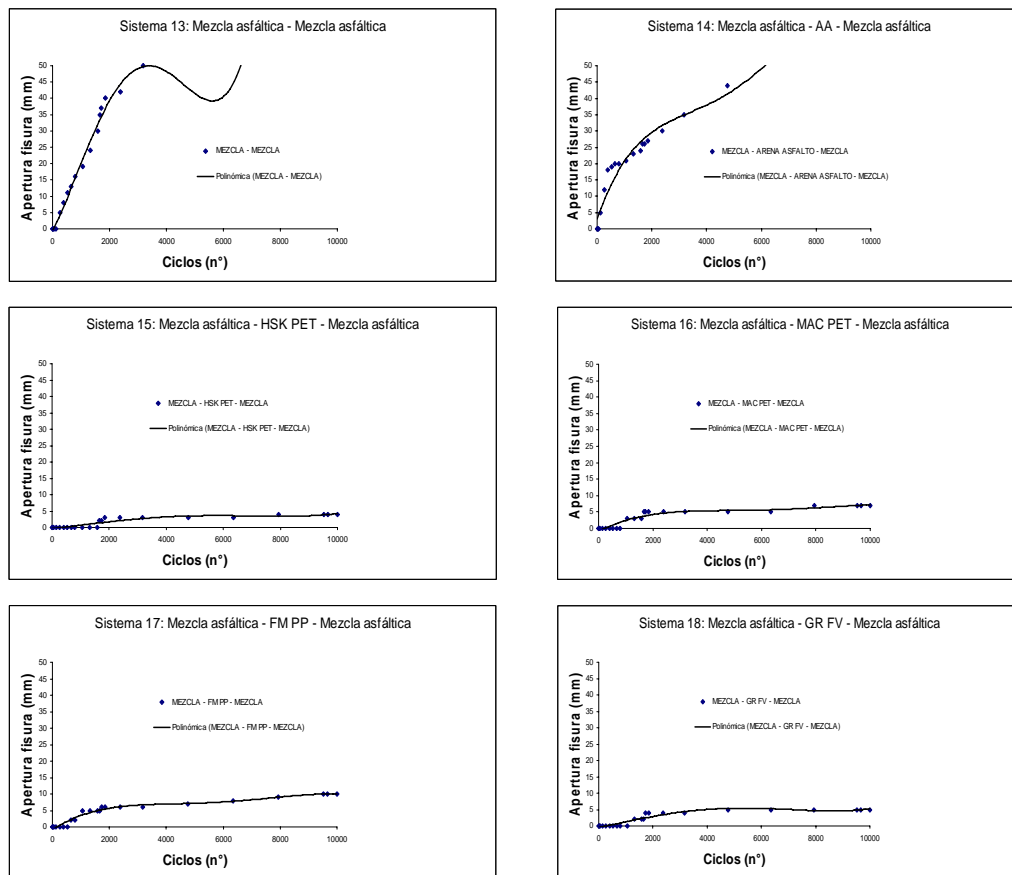


Figura VII.47 Curvas de apertura de fisura en función de los ciclos de carga para ensayo realizado a 60 °C sobre base asfáltica

Se puede apreciar que en el Sistema 1 y en el Sistema 2, los cuales no consideran la interposición de un material geosintético, la tasa de fisuración es elevada, mientras que para los demás sistemas, la altura de la fisura no supera en promedio los 6,5 mm sobre la base asfáltica.



Es preciso aclarar que bajo las condiciones de borde, temperatura de ensayo de 60 °C, cara frontal libre y entre capas asfálticas, la fisura manifiesta un acomodamiento (apertura y cierre) deformándose al paso de la rueda de carga, lo cual no permite un claro seguimiento de la fisura.

La Figura VII.48 presenta las curvas de evolución de fisura en función de la cantidad de ciclos

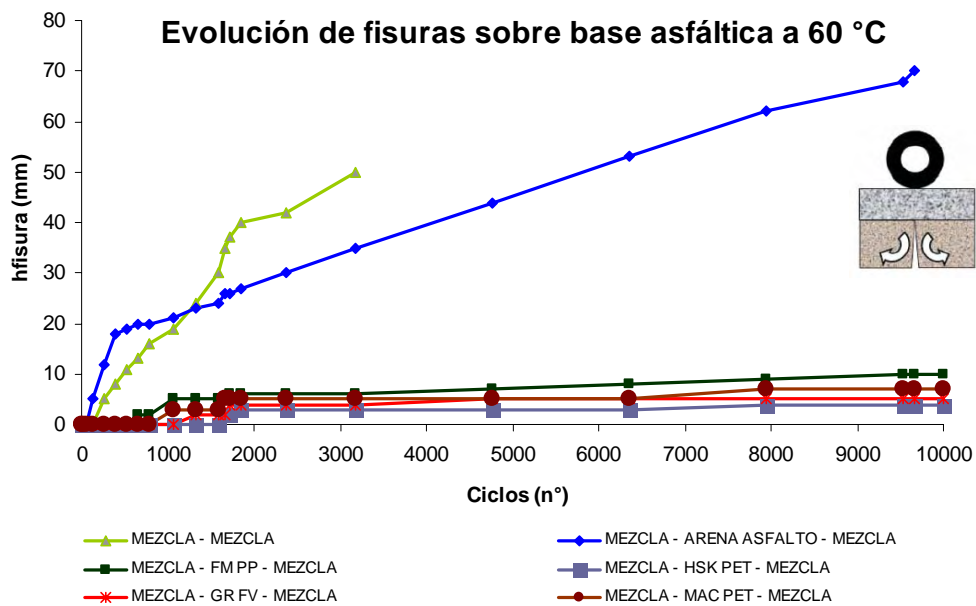


Figura VII.48 Curva de evolución de fisura a 60 °C, sobre base asfáltica

Los sistemas evaluados con base asfáltica pre-fisurada, Figura VII.49 a Figura VII.54, presentan un comportamiento menos evidente del reflejo de las fisuras que los ensayos ejecutados sobre base de hormigón con junta central. Esto se debe a la capacidad de la mezcla asfáltica de acompañar los pequeños movimientos verticales y horizontales de la fisura generada y de la afinidad con los materiales poliméricos introducidos entre capas.



Figura VII.49 Propagación de fisura para la referencia de la investigación



Figura VII.50 Propagación de fisura con interposición de Arena asfalto



Figura VII.51 Propagación de fisura para el material MAC PET



Figura VII.52 Propagación de fisura para el material HSK PET



Figura VII.53 Propagación de fisura para el material GR FV



Figura VII.54 Propagación de fisura para el material FM PP

VII.2.1.8 Análisis del ensayo de rueda de carga

Luego de varios sistemas de apoyo considerados, se obtiene mediante la implementación del equipo de rueda de carga una metodología de valoración de la eficiencia de los materiales, sobre el sistema multicapa que constituye el pavimento.



Para las condiciones con y sin tratamiento anti-reflejo de fisuras, se procuró que la única variable fuese los cambios en “la interfase” entre el sistema rígido (losas) y el flexible (mezcla asfáltica CAC D20), buscando de esta forma establecer como comparativo de la investigación los sistemas considerados como Referencia.

Como se puede observar en la Figura VII.55, cuando se considera una base de hormigón la fisura se inicia y se propaga más rápidamente sobre el refuerzo asfáltico. Sin lugar a dudas, la transición entre materiales es fundamental para que el sistema trabaje eficazmente.

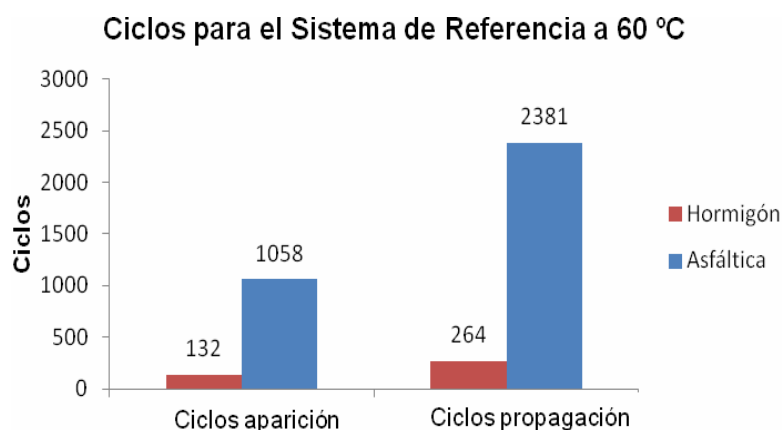
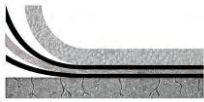


Figura VII.55 Comportamiento de los sistemas de referencia a los ciclos de carga mediante el ensayo WTT efectuados a 60 °C

- **Sobre base de hormigón**

Los sistemas anti-reflejo de fisuras estudiados demuestran su performance frente a condiciones homólogas de ensayo. En este caso el material HSK PVA brinda una mayor eficiencia en el retardo de la fisuración refleja cuando se considera el ensayo a 60 °C, siendo 12 veces mas efectivo que el Sistema de Referencia, seguido por los materiales de malla abierta HSK PET, Membrana + HSK PET y MAC PET respectivamente.



Para los ensayos realizados a 25 °C, el material diseñado Membrana + HSK PET alcanza el mayor beneficio (35,9 veces superior al Sistema de Referencia), seguido por los materiales de malla abierta HSK PVA, HSK PET, MAC PET y GR FV respectivamente, Figura VII.56.

La capa de arena asfalto generalmente se ejecuta como capa de nivelación en pavimentos altamente deteriorados y cuando se piensa colocar un material geosintético, por la afinidad entre materiales a diferencia de las que puede ofrecer el hormigón; para este caso se debe tener presente que se tienen dos interfases trabajando, donde el contacto entre la arena asfalto y el hormigón (Interfase 1) puede fallar antes que la Interfase 2 (arena asfalto, el material geosintético y la mezcla asfáltica), disminuyendo el comportamiento global del sistema.

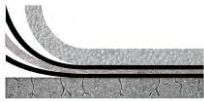
Las curvas de ahuellamiento, presentadas en la Figura VII.29, muestran la deformación producida en la probeta, para los distintos sistemas propuestos.

Se evidencia tanto para el Sistema 1 como para el Sistema 2, una deformación elevada, 8,2 y 8,7 mm respectivamente.

El material GNT PET 150 g. presenta alta deformación inicial, llegando a una deformación máxima de 6,6 mm.

Los materiales RBK y FM PP manifiestan comportamientos parecidos, con una deformación de 5,6 y 5,1 mm respectivamente, mientras que los materiales Membrana + HSK PET y FM PP arena también tienen curvas de ahuellamiento semejantes presentando una menor deformación, siendo estas de 3,4 y 4,1 mm respectivamente.

Los materiales de malla abierta presentan conductas similares, con menor deformación final que los sistemas ante mencionados. El rango de deformación para estos materiales se encuentra entre 2,9 y 3,2 mm con excepción del material GR FV que manifiesta una deformación de 4,5 mm.



Es importante señalar que el Sistema 3, arena asfalto con HSK PET, es el que menor deformación brinda (2,3 mm), esto es producto del comportamiento del material HSK PET entre capas asfálticas.

Los materiales FM PP, FM PP arena, RBK PET, Membrana + HSK PET y GNT PET 150 g. presentan una conformación plana donde las fibras están en una disposición en la estructura que favorece el desplazamiento de la masa asfáltica a diferencia de los materiales HSK PET, HSK PVA, MAC PET y GR FV donde la estructura de malla abierta (40x40mm) permite confinar el esqueleto granular ofreciendo cierta restricción al desplazamiento, siendo de menor abertura el material GR FV (20x20mm).

Se concluye que los materiales geosintéticos no eliminan el problema del reflejo de la fisura pero sí lo retardan considerablemente llegando a tener notables beneficios, como se estima a través del factor de efectividad (FEF), Figura VII.56.

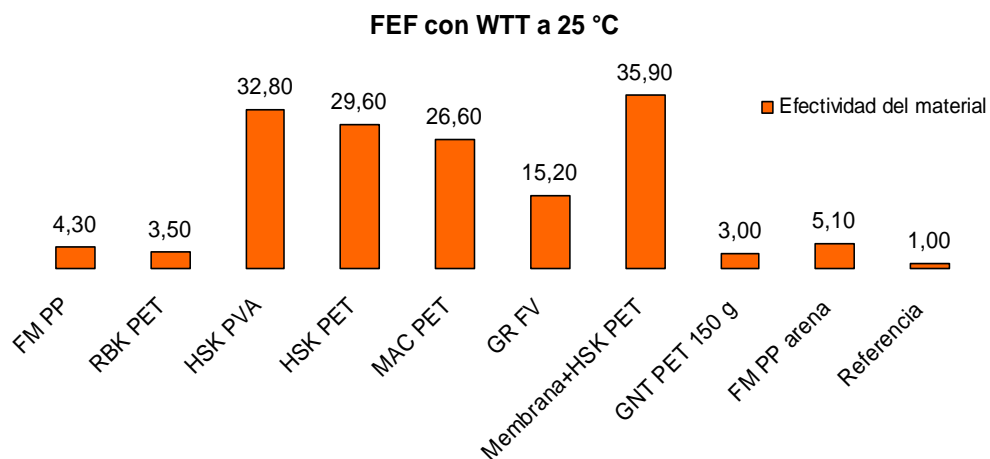
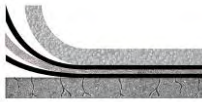


Figura VII.56 Factor de efectividad (FEF) de los diferentes sistemas ante una fisura en propagación para el ensayo (WTT) a 25 °C

- **Sobre base asfáltica**

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de Wheel Tacking Test, los sistemas trabajan mejor entre capas asfálticas; se aprecia que para el ensayo a 60 °C sobre base de hormigón fueron necesarios 132



ciclos, mientras que sobre una base asfáltica son necesarios 264 ciclos para que la fisura se genere sobre la capa de refuerzo. Continuando con el análisis de los sistemas de referencia vemos que los ciclos que fisuran la probeta de referencia con base asfáltica son 2381, mientras que 1058 son los ciclos necesarios para fisurar la probeta con base de hormigón, existiendo una diferencia del 45% de eficiencia entre los sistemas, Figura VII.55.

Los diferentes sistemas que incorporan un material geosintético tienen mejor comportamiento entre capas asfálticas.

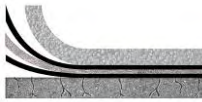
Así, por ejemplo, para el material FM PP se tiene entre capas asfálticas un comportamiento 1,7 veces superior, mientras que para un material de malla abierta como HSK PET o MAC PET el comportamiento es 1,1 veces más ventajoso entre capas asfálticas.

VII.2.2 Modelo de reflejo de fisuras con equipo de cargas cíclicas (MR)LEMaC

Se implementa el equipo de módulo dinámico, descrito en la Norma UNE EN 12697-26, adaptándolo al lo que se denominamos Módulo de Rigidez (MR), Figura VII.57, el cual posee mayor capacidad de carga que el ensayo de rueda de carga WTT y permite que la misma sea aplicada con distintas frecuencias de repetición.

El equipo empleado consta de un actuador neumático, que posibilita la variación de cargas en un rango de 0 a 4,9 kN, y a diversas frecuencias, desde 0,2 Hz a 20 Hz. Todo el equipo se encuentra en una cámara termostatzada que permite trabajar a temperaturas comprendidas entre 5 y 40 °C manteniendo acondicionadas las muestras.

La aplicación de la carga se realiza en posición de flexión y corte. Como se expuso en el Capítulo II, cuando la rueda de un vehículo pasa sobre una fisura, se genera un esfuerzo de corte entre los labios de la misma,



luego flexión y nuevamente corte, por lo que se representan tales sollicitaciones en correspondencia con la junta o fisura generada.



Figura VII.57 Equipo por cargas repetidas implementado

VII.2.2.1 Confección de probetas

Las probetas son confeccionadas de manera similar a las realizadas para el ensayo WTT, con la salvedad de que la probeta elaborada de 300 mm por 300 mm, se corta en largo y ancho de 300 mm y 100 mm respectivamente, obteniendo así una muestra para cada material a ser ensayado, Figura VII.58. De esta manera se tiene la base de hormigón y el riego ejecutado en las mismas condiciones para cada sistema.

VII.2.2.2 Sistema de apoyo

El sistema de apoyo es similar al empleado en el ensayo de WTT con la excepción de que los apoyos (varillas) en los extremos tienen 20 mm de diámetro para permitir una deformación vertical en la junta al aplicar la carga, tanto de flexión como de corte, Figura VII.59.

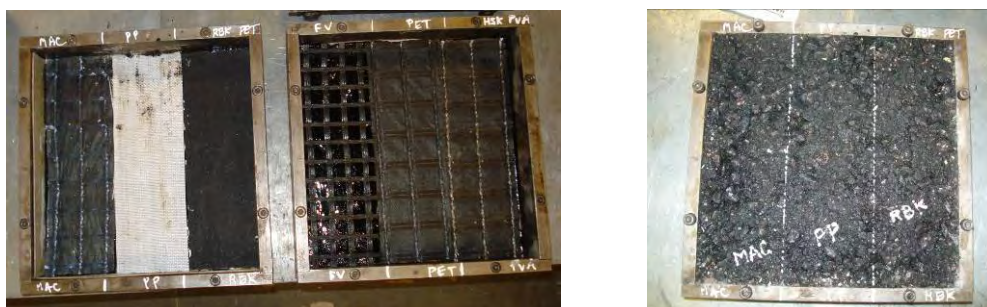
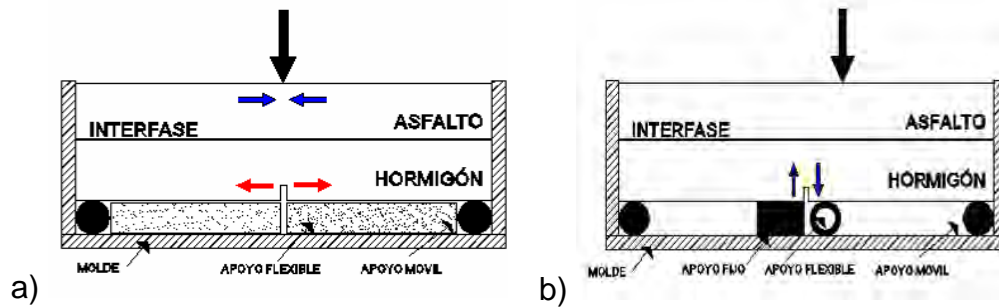
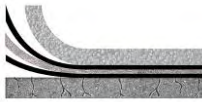


Figura VII.58 Confección de probetas



**Figura VII.59 Esquema de apoyo para cargas repetidas;
a) flexión y b) corte**

VII.2.2.3 Procedimiento de ensayo

Se adapta el instrumental de laboratorio para ejercer una carga linealmente distribuida sobre una viga simplemente apoyada. De esta manera el espécimen ensayado se somete a flexión por cargas repetidas, generándose tracción en su fibra inferior. También se realiza en la posición de corte como se indica en la Figura VII.59b. En este caso, luego de plantear distintos tipos de configuraciones de acuerdo a la bibliografía analizada, se desarrolla el ensayo bajo las siguientes condiciones de borde:

Carga Máxima	$P = 400 \text{ kg}$
Frecuencia	$F = 0,5 \text{ Hz}$ (Según curva UNE EN 12697-26)
Temperatura	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Distancia entre apoyos	$D = 250 \text{ mm}$

Si bien, tanto la frecuencia de carga como la intensidad de aplicación de la misma, no son comparables con cargas reales de sollicitación, el modelo respeta la forma dinámica en que son aplicadas las cargas; de esta forma, los tiempos obtenidos para el inicio y propagación final de la fisura a la capa superficial son indicadores comparables para los distintos sistemas considerados en la tesis bajo las mismas condiciones de borde. Resulta importante considerar esta situación ya que es posible que el comportamiento de los sistemas pueda registrar variaciones según se modifiquen las condiciones de borde.

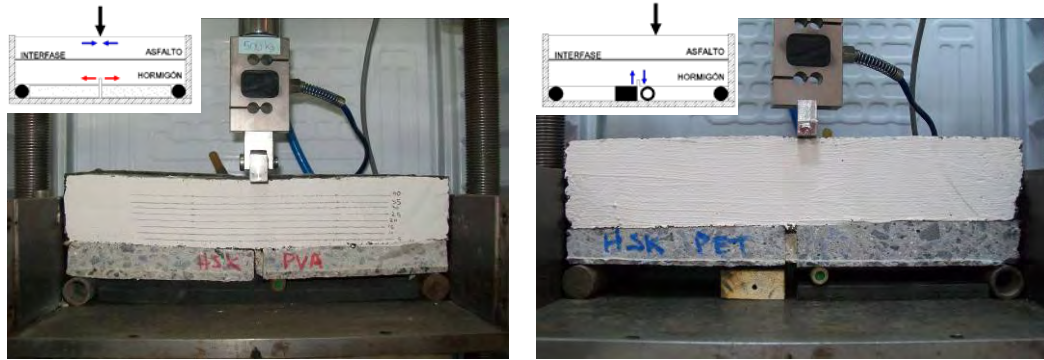


Figura VII.60 Equipo de cargas repetidas;
a) posición de flexión b) posición de corte

VII.2.2.4 Resultados a flexión

La pendiente de las curvas permite observar, desde el inicio hasta que la fisura propaga, la tasa de propagación para cada sistema, Tablas VII.11 y VII.12 y Figuras VII.61 a VII.70.

Tabla VII.11 Resultados a flexión por cargas repetidas

Material	Ciclos de aparición de la fisura (nº)	Ciclo de propagación (nº)
Sistema 1 (Referencia)	9	12
Sistema 2 (Arena asfalto)	5	23
Sistema 3 (Arena asfalto + HSK PET)	5-31	31-148
Sistema 4 (HSK PET)	47	134
Sistema 5 (MAC PET)	40	130
Sistema 6 (RBK PET)	26	108
Sistema 7 (HSK PVA)	55	155
Sistema 8 (FM PP)	32	120
Sistema 9 (GR FV)	23	71
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	40	139
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	10	53
Sistema 12 (FM PP arena)	30	128



Evaluación por flexión mediante carga cíclica

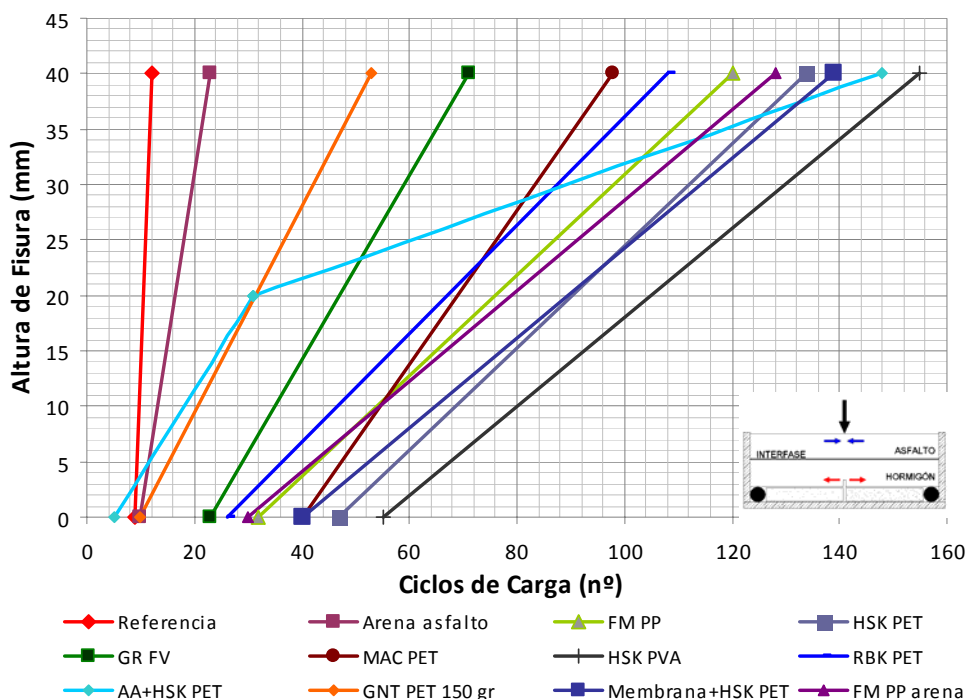


Figura VII.61 Curvas de evolución de fisuras (posición de flexión)

Tabla VII.12 Factor de efectividad (FEF) a 25 °C, posición de flexión

Material	Número de ciclos (n°)	FEF (Nr/Nn)
Sistema 1 (Referencia)	12	1,0
Sistema 2 (Arena asfalto)	23	1,9
Sistema 3 (Arena asfalto + HSK PET)	148	12,3
Sistema 4 (HSK PET)	134	11,2
Sistema 5 (MAC PET)	130	10,8
Sistema 6 (RBK PET)	108	9,0
Sistema 7 (HSK PVA)	155	12,9
Sistema 8 (FM PP)	120	10,0
Sistema 9 (GR FV)	71	5,9
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	139	11,6
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	53	4,4
Sistema 12 (FM PP arena)	128	10,7

Nr: n° de ciclos que genera la falla en la probeta con material geosintético

Nn: n° de ciclos que genera la falla en la probeta sin material geosintético

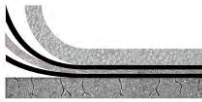


Figura VII.62 Referencia



Figura VII.63 FM PP



Figura VII.64 GNT PET 150 g.



Figura VII.65 HSK PVA



Figura VII.66 RBK PET



Figura VII.67 AA+HSK PET



Figura VII.68 Membrana+HSKPET



Figura VII.69 MAC PET

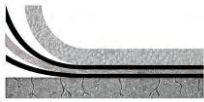
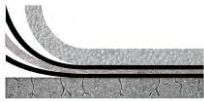


Figura VII.70 FM PP arena

De acuerdo a lo citado en el Capítulo II, Punto II.7.3, se define la fisura de la siguiente manera según su evolución, Tabla VII.13.

Tabla VII.13 Tipo de fisura según la capa intermedia

Sistema	Tipo de fisura
Sistema 1 (Referencia)	Fisura sin capa especial intermedia; la fisura se desarrolla vertical
Sistema 2 (Arena asfalto)	Fisura vertical sobre la capa de arena asfalto; propagación vertical mas lenta sobre la capa asfáltica. Fisura Tipo I
Sistema 3 (Arena asfalto+HSK PET)	Fisura vertical sobre la capa de arena asfalto, redirección en la interfase por el material intermedio y propagación vertical nuevamente. Fisura Tipo III
Sistema 4 (HSK PET)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 5 (MAC PET)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 6 (RBK PET)	Fisura vertical con retardo. Fisura Tipo II
Sistema 7 (HSK PVA)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 8 (FM PP)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 9 (GR FV)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 10 (Membrana+HSK PET)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III
Sistema 12 (FM PP arena)	Redirección y retardo. Fisura Tipo III



Los diferentes materiales manifiestan su comportamiento ante una fisura en desarrollo, de acuerdo a la conformación y estructura del material; estos demuestran un trabajo claro en la prevención y retardo de la fisuración que se da en los pavimentos.

La clasificación del tipo de fisura que se produce en el ensayo esta en correspondencia con el tipo de material considerado en la interfase del sistema compuesto.

Como se puede observar en la Figura VII.71, el esfuerzo de tracción que los materiales ofrecen se ven plasmados en una mayor resistencia a la propagación de fisura (números de ciclos para que la fisura alcance la superficie) sobre la capa asfáltica de refuerzo, debido al efecto de costura que los materiales entregan.

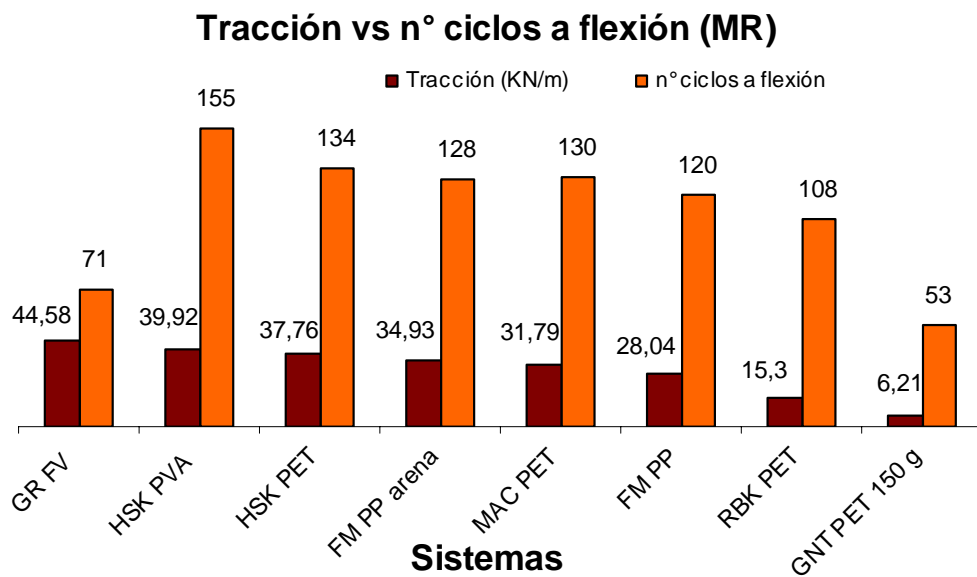


Figura VII.71 Tracción de los materiales vs cantidad de ciclos a flexión

VII.2.2.5 Resultados por corte

La Tabla VII.14 presenta los resultados por corte, mientras que la Tabla VII.15 el factor de efectividad de los sistemas, Figuras VII.71 a VII.81.

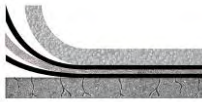


Tabla VII.14 Resultados por corte con cargas repetidas

Material	Ciclos de aparición de la fisura (nº)	Ciclo de propagación (nº)
Sistema 1 (Referencia)	6	900
Sistema 2 (Arena asfalto)	4	972
Sistema 3 (Arena asfalto+HSK PET)	3-72	72-3762
Sistema 4 (HSK PET)	200	6400
Sistema 5 (MAC PET)	221	5990
Sistema 6 (RBK PET)	268	1886
Sistema 7 (HSK PVA)	500	6200
Sistema 8 (FM PP)	300	2476
Sistema 9 (GR FV)	600	5100
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	315	6550
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	102	1957
Sistema 12 (FM PP arena)	317	3400

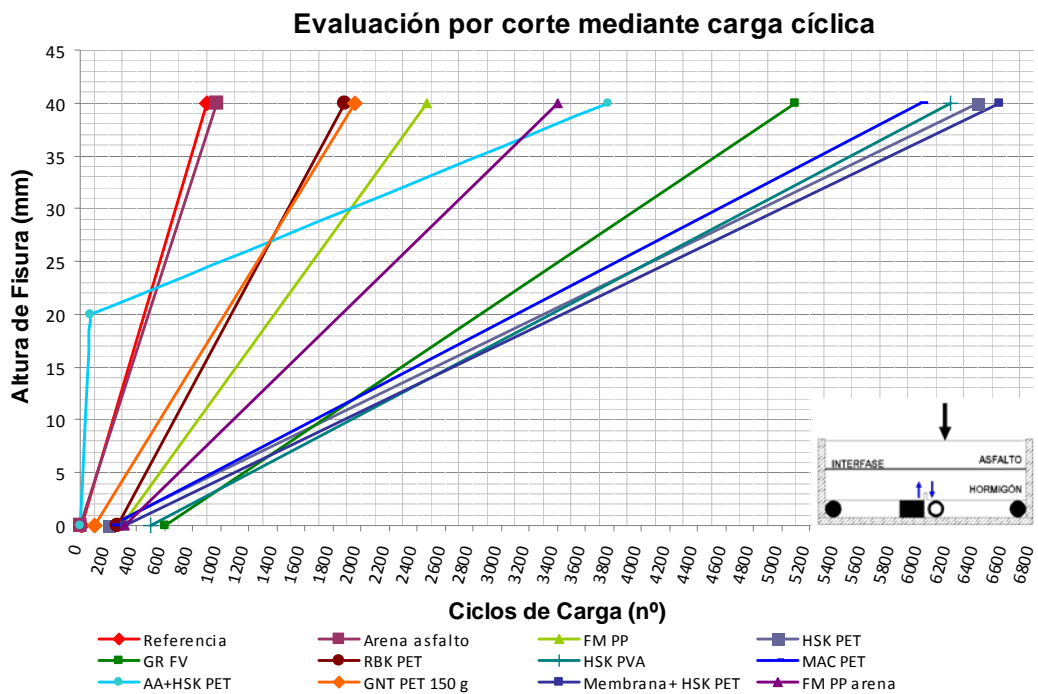


Figura VII.72 Curvas de evolución de fisuras (posición de corte)



Tabla VII.15 Factor de efectividad (FEF) a 25 °C, posición de corte

Material	Número de ciclos (n°)	FEF (Nr/Nn)
Sistema 1 (Referencia)	900	1,0
Sistema 2 (Arena asfalto)	972	1,1
Sistema 3 (Arena asfalto + HSK PET)	3762	4,2
Sistema 4 (HSK PET)	6400	7,1
Sistema 5 (MAC PET)	5990	6,7
Sistema 6 (RBK PET)	1886	2,1
Sistema 7 (HSK PVA)	6200	6,9
Sistema 8 (FM PP)	1957	2,8
Sistema 9 (GR FV)	5100	5,7
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	6550	7,3
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	3400	2,2
Sistema 12 (FM PP arena)	2476	3,8

Nr: n° de ciclos que genera la falla en la probeta con material geosintético

Nn: n° de ciclos que genera la falla en la probeta sin material geosintético



Figura VII.73 MAC PET



Figura VII.74 Referencia



Figura VII.75 GNT PET 150 g.



Figura VII.76 HSK PVA

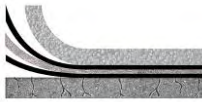


Figura VII.77 RBK PET



Figura VII.78 AA+HSK PET



Figura VII.79 HSK PET



Figura VII.80 GR FV

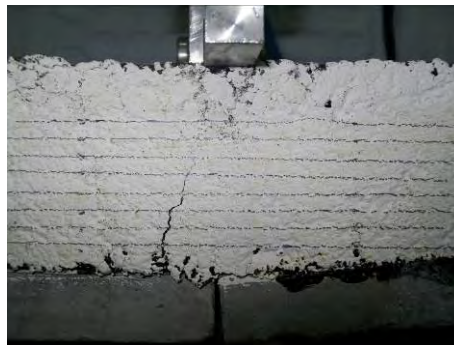


Figura VII.81 FM PP

Comparativamente se realizan ensayos sobre una base asfáltica considerando algunos de los sistemas propuestos, el ensayo se realiza en posición de flexión, por ser la sollicitación más desfavorable. Los resultados se presentan en la Tabla VII.16.



Tabla VII.16 Resultados a flexión sobre base asfáltica

Material	Ciclos de aparición de la fisura (nº)	Ciclo de propagación (nº)
Sistema 13 (Referencia)	8	25
Sistema 15 (HSK PET)	25	386
Sistema 16 (MAC PET)	42	298
Sistema 17 (FM PP)	33	220
Sistema 19 (GNT PET 150 g.)	13	171
Sistema 20 (RBK PET)	29	201

La Figura VII.82 indica el punto de inicio de la fisura en la fibra inferior de la capa y el punto en que la misma alcanza los 40 mm. Estas muestran la tasa de propagación de las fisuras para los sistemas considerados.

Evaluación por flexion mediante carga cíclica sobre base asfáltica

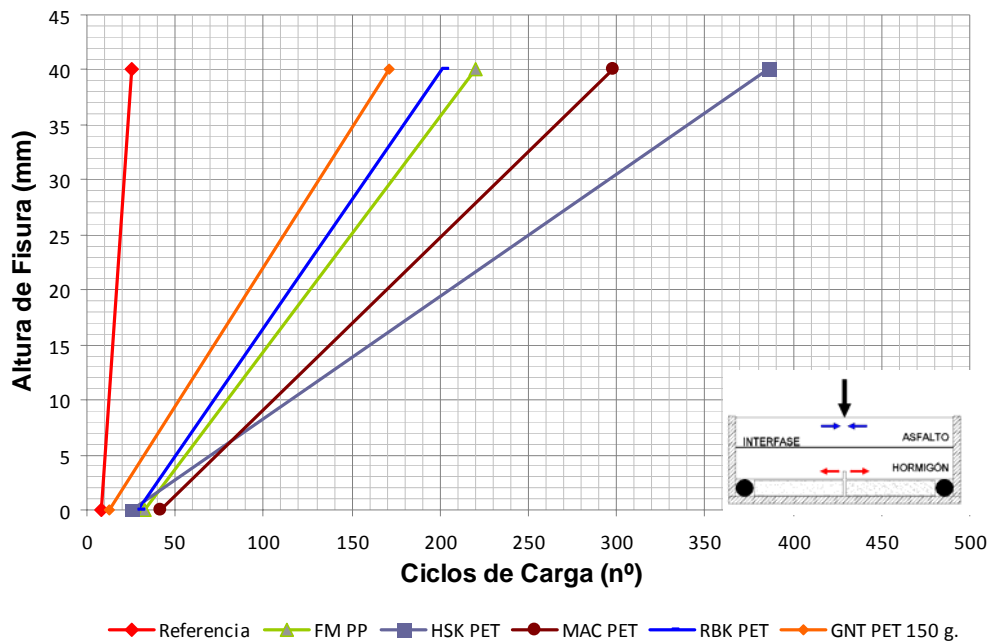


Figura VII.82 Curvas de evolución de fisuras (posición de flexión) sobre base asfáltica

La Tabla VII.17 indica los valores de factores de efectividad alcanzados por los distintos sistemas.



Tabla VII.17 Factor de efectividad (FEF) a 25 °C, posición de flexión sobre base asfáltica

Material	Numero de ciclos (n°)	FEF (Nr/Nn)
Sistema 13 (Referencia)	25	1,0
Sistema 15 (HSK PET)	386	15,4
Sistema 16 (MAC PET)	298	11,9
Sistema 17 (FM PP)	220	8,8
Sistema 19 (GNT PET 150 g.)	171	6,8
Sistema 20 (RBK PET)	201	8,0

Nr: n° de ciclos que generan la falla en la probeta con material geosintético

Nn: n° de ciclos que generan la falla en la probeta sin material geosintético

Se presenta la secuencia fotográfica de la evolución de la fisura para el material FM PP, Figura VII.83 y de los ensayos más representativos.



Figura a:

Ciclo: 38

h fisura = 5 mm

Figura b:

Ciclo: 120

h fisura = 20 mm

Figura c:

Ciclo: 166

h fisura = 30 mm

Figura d:

Ciclo: 220

h fisura = 40 mm

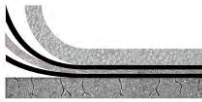
Figura VII.83 Evolución de fisura considerando el material FM PP a 25 °C



VII.84 Referencia



VII.85 GNT PET 150 g.



VII.86 HSK PET



VII.87 RBK PET



VII.88 FM PP



VII.89 MAC PET

Se realiza, para uno de los ensayos de carga cíclica (MR) a flexión considerando una base de hormigón y el material HSK PVA, la determinación de la apertura de fisura versus los ciclos de carga, mediante un medidor de desplazamientos (LVDT) colocado en correspondencia con la junta, registrándose amplitudes entre 0,004 mm y 1,2 mm, Figura VII.90.

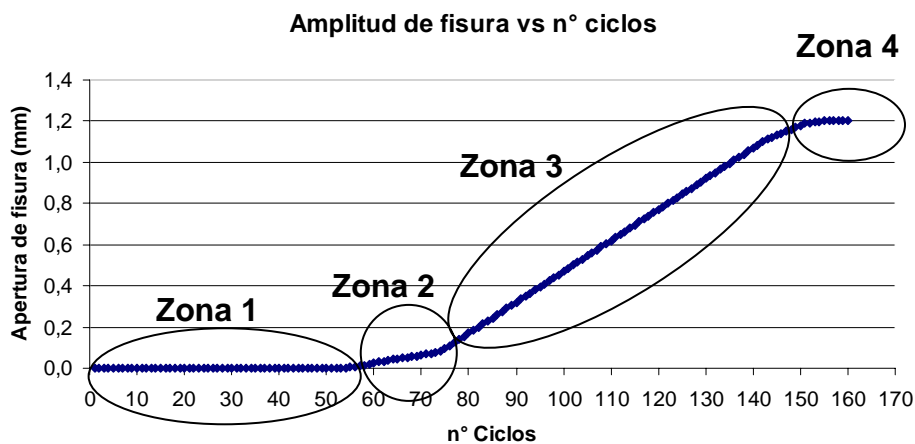
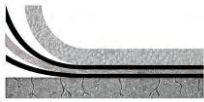


Figura VII.90 Amplitud de fisura en función de los ciclos de carga



En la mayoría de los sistemas que consideran la interposición de un material geosintético la fisura principal, producida en la fibra inferior de la capa asfáltica dispuesta como refuerzo, manifiesta los mismos intervalos de apertura y cierre de fisura.

Realizando un análisis de la curva podemos identificar algunas zonas características del ensayo:

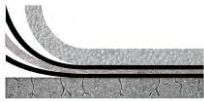
Una Zona 1 donde la curva presenta baja pendiente, lo que corresponde al trabajo del material geosintético frente al número de ciclos de carga; una Zona 2 superados los 55 ciclos, donde la fisura aparece en la capa asfáltica de refuerzo con una pendiente suave, pasando de una amplitud de fisura de 0,04 a 0,07 mm; una Zona 3 donde la fisura aumenta su velocidad de propagación sobre la capa asfáltica, llevando el mayor número de ciclos del ensayo y donde la amplitud de la fisura pasa de 0,08 a 1,16 mm, hasta alcanzar la Zona 4 que podemos definirla como rotura de la mezcla asfáltica, donde la fisura alcanza la superficie de la capa de refuerzo, llegando a una amplitud de fisura de 1,2 mm en la fibra inferior.

VII.2.2.6 Análisis del ensayo de módulo de rigidez

El modelo respeta la forma dinámica con que son aplicadas las cargas en un pavimento al paso de la rueda de los vehículos. Los tiempos de propagación obtenidos son indicadores comparables para estas mismas condiciones de borde, pudiendo determinar el factor de efectividad (FEF) brindado por cada sistema.

Observando las tasas de crecimiento de la fisura, tanto en posición de corte como de flexión, queda demostrado que los materiales geosintéticos, según conformación y estructura contribuyen en la prevención de la fisuración refleja, aumentando la vida útil de estos.

Al aplicar la carga, la propagación se evidencia rápidamente donde el ascenso vertical de la fisura va acompañando las caras de los agregados



que encuentra a medida que la fisura se desarrolla. Para este caso la distribución granulométrica de los áridos presentes en la capa asfáltica influyen en el crecimiento de la fisura ante la carga aplicada.

Al interponer un material geosintético en su camino, el ascenso se interrumpe temporalmente con cierta redirección en una horizontal, según el tipo de material, para luego seguir su camino en forma vertical uniéndose con micro fisuras generadas en la masa de la mezcla asfáltica como causa de la fatiga de la misma. En algunos casos el mecanismo de fisuración pasa de tener una única fisura a varias micro fisuras de menor potencial de propagación.

La posición de flexión es la que mayor sollicitación transfiere al material, evidenciándose en los resultados obtenidos. Pero debe tenerse presente que la sollicitación de corte, para cada ciclo de carga del paso de un vehículo sobre la fisura, se produce dos veces mientras que la sollicitación por flexión solo una.

En todos los casos la interposición de un material geosintético ofrece retardo en la propagación de una fisura hacia la superficie de la capa asfáltica dispuesta como refuerzo sobre el hormigón, Figura VII.91.

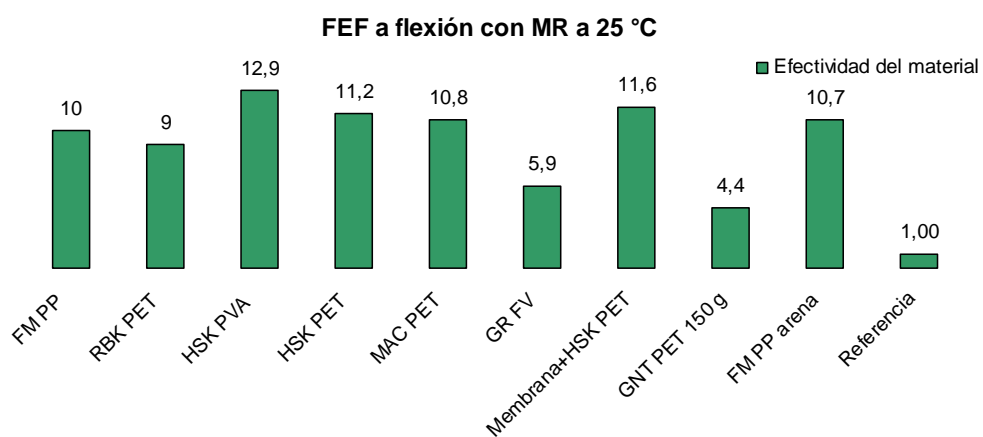
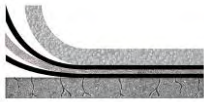


Figura VII.91 Factor de efectividad (FEF) de los diferentes sistemas ante una fisura en propagación para el ensayo (MR) a 25 °C



- **Sobre base de hormigón**

Los materiales geosintéticos presentan buen comportamiento al ser colocados directamente sobre una losa de hormigón, previo riego de liga con emulsión ECRR-M. Todos los materiales presentan beneficios en comparación con el Sistema 1 de Referencia y el Sistema 2 donde interviene una capa de arena asfalto.

Dentro de la utilización de los materiales geosintéticos, aquellos conformados por una membrana viscoelástica (FM PP, RBK PET y FM PP arena) manifiestan el inicio de la fisura en menor cantidad de ciclos que para los materiales de malla abierta. Esto se explica con los resultados de resistencia a tracción que estos últimos ofrecen.

El material compuesto por una Membrana + HSK PET retarda el inicio de la fisura en comparación con los materiales antes mencionados, donde las fibras quedan inmersas en la membrana, proporcionando un comportamiento más efectivo que para el material HSK PET sin membrana; ofreciendo adicionalmente una barrera impermeable.

Ahora bien, si antes de colocar el material HSK PET directamente sobre el hormigón, se ejecuta previamente una capa de arena asfalto, se está ayudando al material a trabajar mejor, ya que este tiene mayor afinidad con el material asfáltico, aunque la capa de arena asfalto se fisure en un tiempo relativamente más corto que para los demás sistemas.

Para el material GR FV no se tienen buenos resultados a pesar de tratarse de un material de alto módulo de rigidez; se entiende que los bajos resultados alcanzados son producto de la pérdida de resistencia a tracción del material debido a la temperatura de compactación de la mezcla asfáltica (Capítulo V, Figura V.21), conformación plana del material con escasa abertura de malla (20x20 mm), donde se evidencia el despegue de las capas durante el ensayo.



De acuerdo al factor de efectividad (FEF) determinado para los sistemas, se destaca el material compuesto por la Membrana + HSK PET como aquel que brinda a la sollicitación de corte un beneficio 7,3 veces superior, mientras que el material HSK PVA lo hace a la flexión con una efectividad 12,9 veces mayor, en comparación con el sistema de Referencia.

- **Sobre base asfáltica**

De los ensayos realizados en forma comparativa, considerando una base asfáltica podemos concluir que: en todos los casos se manifiesta un mayor beneficio en el retardo de la fisuración refleja cuando los materiales se introducen entre capas asfálticas, Figura VII.92.

El material HSK PET es el que mayor beneficio ofrece en el retardo de una fisura en crecimiento con una efectividad 15,4 veces superior.

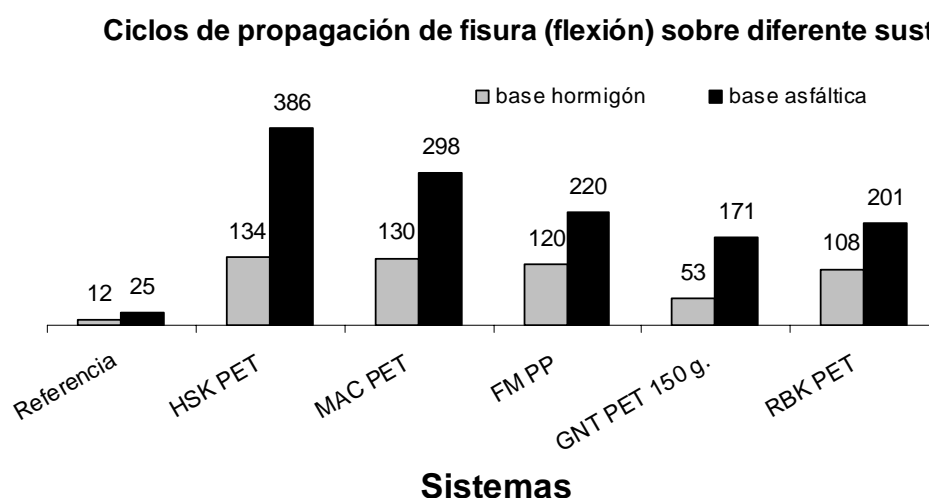


Figura VII.92 Comportamiento a fatiga de los geosintéticos entre diferentes capas

VII.3 ADHERENCIA ENTRE CAPAS CON Y SIN LA INTERPOSICIÓN DE GRILLAS POLIMÉRICAS

Varios equipos fueron implementados y diseñados a fin de valorar la adherencia entre capas, estos se valen de aplicar esfuerzos de tracción,



corte y/o torsión en la interfase; describimos y desarrollamos los equipos implementados en la presente tesis para el estudio de la adherencia.

VII.3.1 Adherencia mediante ensayo de corte LCB

El ensayo LCB somete a testigos extraídos en campo o probetas confeccionadas en laboratorio a un esfuerzo de corte por flexión y permite valorar la tensión de adherencia que se genera en el plano de discontinuidad.

Se implementa este ensayo determinando diferentes parámetros:

- *Resistencia de adherencia:* Se calcula la resistencia de adherencia, τ , expresada en MPa, directamente de los datos obtenidos de la máquina de ensayo, utilizando la siguiente Ecuación :

$$\tau = \frac{P}{2 \cdot A_T} \cdot 0,0980665$$

donde:

τ : es la resistencia de adherencia, en MPa

P: es la carga máxima, en kilogramos, aplicada por la celda de carga que corresponde al doble de la carga en la reacción.

A_T : es el área transversal de la probeta, en centímetros cuadrados

- *Deslizamiento correspondiente a la carga máxima:* Del registro continuo de deformación se identifica y se registra la deformación correspondiente a la carga máxima, en milímetros.
- *Trabajo resistido por el espécimen:* Para calcular el trabajo resistido por el espécimen de ensayo T, expresado en kilogramos fuerza x milímetros, se aplica la siguiente ecuación sobre el registro continuo de la máquina de ensayo.



$$T = \sum \Delta D \cdot \Delta C_{prom}$$

donde:

ΔD : es el diferencial de deslizamiento entre dos registros sucesivos de la máquina de ensayo

ΔC_{prom} : es el valor de reacción promedio para un intervalo de deslizamiento igual al ΔD correspondiente. Entendiéndose como reacción a la carga realmente aplicada en la interfase (P/2).

La Figura VII.93 y Figura VII.94 presentan el instrumental implementado para la realización del ensayo LCB.

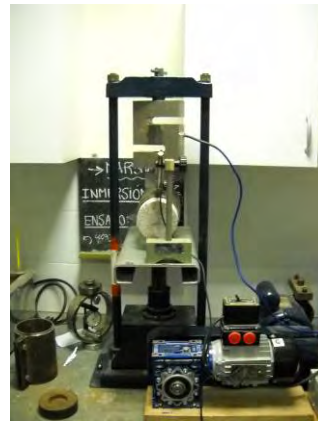
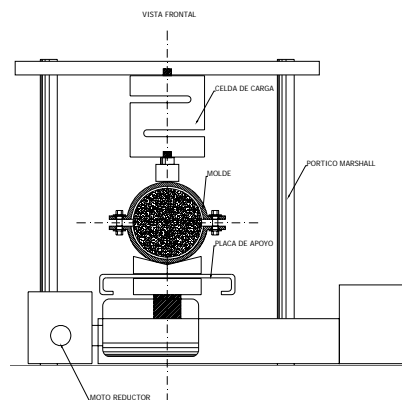


Figura VII.93 vista frontal de la máquina para el ensayo de corte por flexión LCB

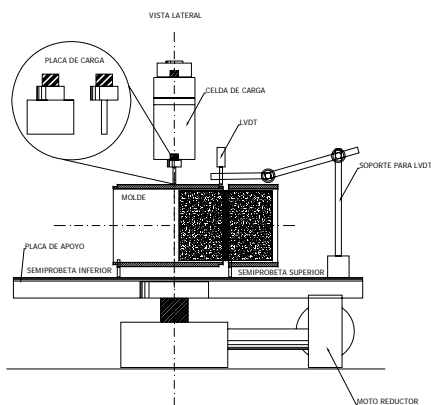


Figura VII.94 vista lateral de máquina para el ensayo de corte por flexión LCB



VII.3.1.1 Confección de probetas

Se confecciona un mínimo de tres probetas de ensayo por cada uno de los sistemas propuestos.

Las probetas poseen dimensiones similares a las probetas Marshall (101,6 mm de diámetro) pero con el doble de su altura, y están constituidas por:

En el caso de las probetas sin material geosintético, Sistema 1 al que denominamos “Referencia”: una capa de hormigón elaborado ad-hoc de 5 cm de espesor, un riego de 0,90 l/m² de dotación, y la capa de mezcla asfáltica en caliente tipo CAC D20, Figura VII.95a.

Las probetas con material geosintético: una base del hormigón elaborado ad-hoc de 5 cm de espesor, un riego de 0,9 l/m² de dotación, el material geosintético, un segundo riego solo para el material FM PP donde la dotación aconsejada es de 0,25 l/m², y para el material GNT PET 150 g., donde la dotación aconsejada es de 0,5 l/m², según la conformación de los materiales, y la capa de mezcla asfáltica en caliente tipo CAC D20, Figura VII.95b.

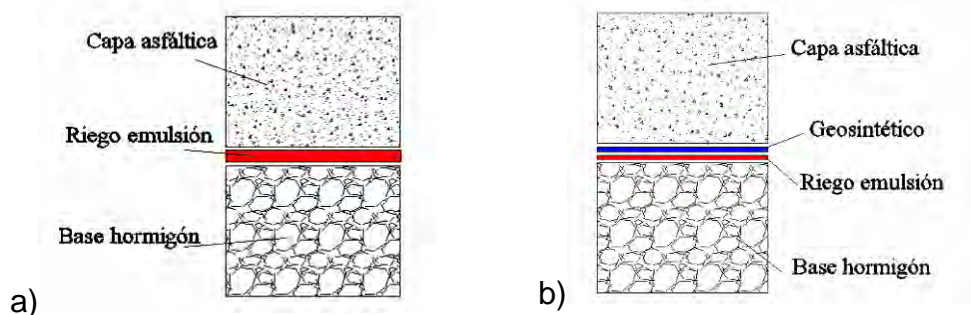


Figura VII.95 Esquema de probeta a) referencia b) con geosintético

VII.3.1.2 Secuencia de moldeo

Para efectuar los ensayos de adherencia mediante este método, las probetas requieren una conformación especial debido a que el método



Marshall considera cierto número de golpes en ambas caras de la probeta, por lo tanto consideramos la compactación en una sola cara para conformar nuestros sistemas. Para ello se determina la energía de compactación (E_c) necesaria para asegurar la representabilidad de las probetas.

La energía de compactación (E_c), analizada por varios autores, es en este caso determinada de la siguiente manera:

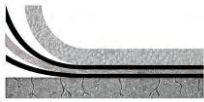
$$E_c = \frac{\text{Pesodelpisón[kg]} \cdot \text{Nrogolpes} \cdot \text{Altura[cm]}}{\text{Volumen[cm}^3\text{]}}$$

Esta expresión surge de los estudios de mecánica de suelos, desarrollada por Proctor R., la cual puede ser extrapolada a distintos materiales como la mezcla asfáltica, donde el ensayo Marshall, para su determinación de estabilidad y fluencia, según los lineamientos de la Dirección Nacional de vialidad en su norma VN-E9-86 estipula el peso del pisón de compactación (4,54 kg), la altura de caída del mismo (457 mm) y las dimensiones de la probeta terminada (101,6 mm de diámetro y 63,5 mm \pm 3 mm de altura).



Figura VII.96 Pisón de compactación empleado para el moldeo

Siguiendo los lineamientos, se confeccionan 3 probetas patrones, compactadas con 75 golpes por cara llegando a aplicar una energía de compactación de 61,26 Kg cm/cm³. Se obtienen así los parámetros de altura, volumen y densidad de la probeta de referencia, Tabla VII.18.



Con objeto de moldear y lograr, sobre la base de hormigón, los parámetros obtenidos de la probeta de referencia (altura, volumen, densidad) se moldean probetas aplicando 120, 130 y 150 golpes, sobre la cara de mezcla asfáltica, buscando acercarnos a los parámetros obtenidos para la probeta patrón. Para ello se moldea la mezcla asfáltica a 160 °C directamente sobre el hormigón, sin riego de liga, de modo de obtener la probeta asfáltica para determinar sus parámetros.

Se evidencia de esta manera que no existe adherencia alguna entre la capa hormigón-asfalto, ya que al desmoldar el sistema las capas se separan sin esfuerzo.

VII.3.1.2.1 Moldeo de la probeta de referencia

Se coloca en un molde Marshall, acondicionado en estufa y sobre un papel de filtro, 1200 g. de mezcla asfáltica densa convencional tipo CAC D20, calentada a 160 °C. Se compacta con 75 golpes en una cara asegurándose la limpieza y temperatura del pisón. Se da vuelta la probeta y se aplican otros 75 golpes en la cara invertida. Terminada la compactación se retiran los papeles de filtro de ambas caras, se identifica la probeta y se deja enfriar para luego desmoldarla y realizar las determinaciones de densidad, volumen y altura, sobre la probeta.

VII.3.1.2.2 Moldeo de la probeta sobre base de hormigón

Se confeccionan probetas cilíndricas de hormigón de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura, luego se cortan en tres tercios para obtener de esta manera una probeta de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura. Sobre esta probeta se coloca y compacta la mezcla asfáltica densa convencional tipo CAC D20 en caliente, según la metodología Marshall. Finalizada la compactación se procede al desmolde de la capa asfáltica compactada sobre la de hormigón y se determina su altura, volumen y densidad.

**Tabla VII.18 Valores obtenidos luego de la compactación de las probetas**

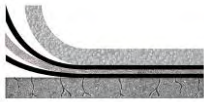
Probeta	N golpe	Densidad (g/cm ³)	Prom.	Volumen (cm ³)	Prom.	Altura (mm)	Prom.	Ec (Kg cm/cm ³)
1		2,352		509,5		6,0		
2	75	2,363	2,354	503,4	508,0	5,9	5,9	61,26
3		2,348		511,1		5,9		
1		2,336		521,2		6,2		
2	120	2,301	2,314	518,8	518,5	6,1	6,2	50,72
3		2,316		515,6		6,2		
1		2,340		509		6,1		
2	130	2,335	2,339	512,8	511,6	6,1	6,1	52,02
3		2,341		513		6,0		
1		2,343		506,4		6,1		
2	150	2,340	2,341	509,1	508,5	5,9	6,0	60,54
3		2,339		510,1		6,0		

Se adopta de esta manera una compactación con 150 golpes sobre la mezcla asfáltica, logrando parámetros cercanos a la probeta de referencia.

Considerando la dotación sobre la base de hormigón de 0,9 l/m², el área de la probeta (0,00785 m²) y el porcentaje de residuo de la emulsión (65,3%), la cantidad de riego es de 10,8 g de emulsión ECRR – M.

VII.3.1.3 Procedimiento de ensayo

Se coloca la probeta de ensayo en posición horizontal, apoyada en dos puntos como una viga simplemente apoyada. El plano de debilidad, interfase, debe quedar en las cercanías de uno de los apoyos, como puede observarse en las Figura VII.94. Se aplica una carga centrada P de tal modo que el espécimen esté sometido a flexión, y que la sollicitación en el plano de debilidad sea un esfuerzo cortante con un valor de carga equivalente a P/2. El ensayo se efectúa a una velocidad de 1,27 mm/min y a una temperatura de 22 +/- 2 °C.



La adopción de la temperatura y velocidad de carga surge del análisis realizado por Vargas Saa P. (2008) donde concluye que a mayores velocidades de ensayo los resultados de adherencia al corte resultan sobrevalorados y con el aumento de la temperatura los valores de adherencia al corte disminuyen considerablemente.



Figura VII.97 Vista del registro del software

VII.3.1.4 Resultados sobre base de hormigón

Se realiza, primeramente, el ensayo de adherencia aplicando diferentes emulsiones (EAI, ETRAD y ECRR-M) utilizando el Sistema 1 (base de hormigón / capa asfáltica sin material intermedio) con objeto de observar el comportamiento de cada una de las emulsiones.

El gráfico presentado en la Figura VII.98 muestra los valores obtenidos de la resistencia por corte ofrecida por las diferentes emulsiones. Los resultados se presentan en la Tabla VII.19.

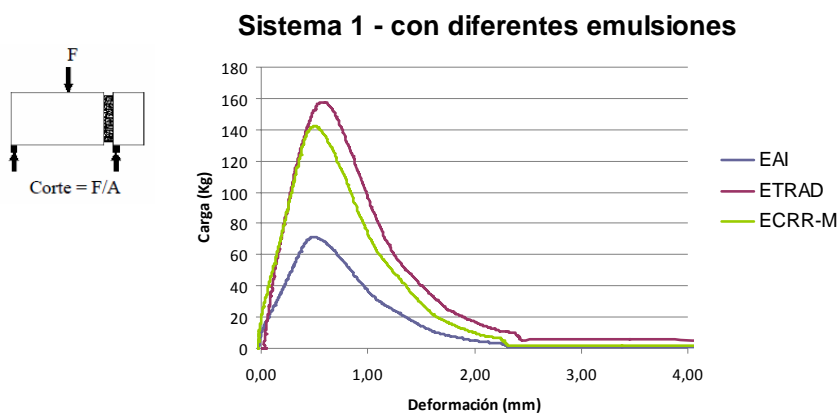


Figura VII.98 Adherencia con diferentes emulsiones para el Sistema 1

Nota: Los resultados son promedio de tres determinaciones

**Tabla VII.19 Probetas con diferentes emulsiones para el Sistema 1**

Material	Carga aplicada (Kg)	Carga en la interfase (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
EAI	142,04	71,02	0,48	0,083	70,13
ECRR-M	284,08	142,04	0,48	0,167	108,98
ETRAD	315,39	157,69	0,56	0,185	140,26

Las emulsiones ECRR-M y la ETRAD tienen comportamientos similares, siendo la ETRAD la que mayor resistencia brinda al despegue de las capas. Este tipo de emulsión posee, a diferencia de las otras, un residuo mas duro; debe tenerse en cuenta que una vez que este tipo de emulsión coalesce (rompe) pierde pegajosidad, la cual recupera al ser calentado con la colocación de la mezcla asfáltica en caliente sobre la misma. Por este motivo no es aconsejable utilizar este tipo de emulsión cuando se piensa incorporar un material geosintético que cubra toda la interfase ya que no se logra el trabajo efectivo del sistema.

Este ensayo fue realizado en una primera etapa, aportando a la decisión del uso de la emulsión ECRR-M; por ello se realizan la mayor cantidad de ensayos de caracterización sobre esta emulsión y debido a que es actualmente de continua fabricación y utilización por diferentes reparticiones viales de nuestro país.

VII.3.1.4.1 Modelo sin geosintético

Tabla VII.20 Probetas sin material intermedio

Material	Carga aplicada (Kg)	Carga en la interfase (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
Sistema 1 (Referencia)	381,01	190,51	0,55	0,22	156,3
Sistema 2 (Arena Asfalto)	214,91	107,45	0,99	0,13	121,9

Nota: los resultados son el promedio de tres determinaciones

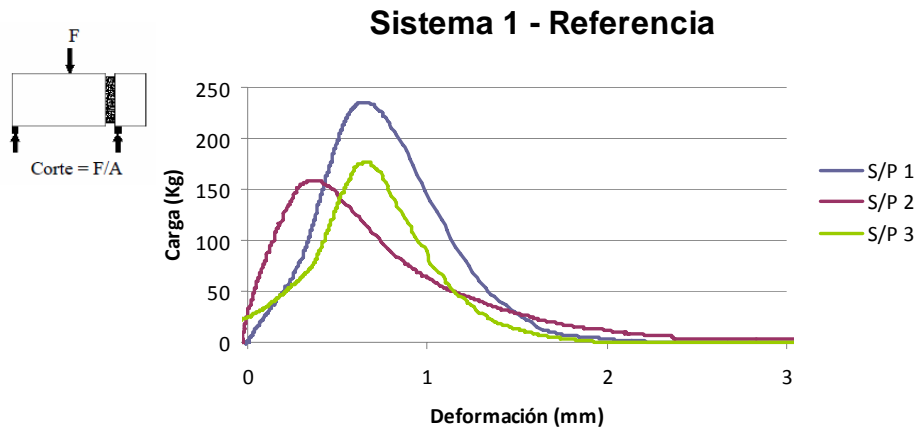


Figura VII.99 Carga vs. deformación para el Sistema 1

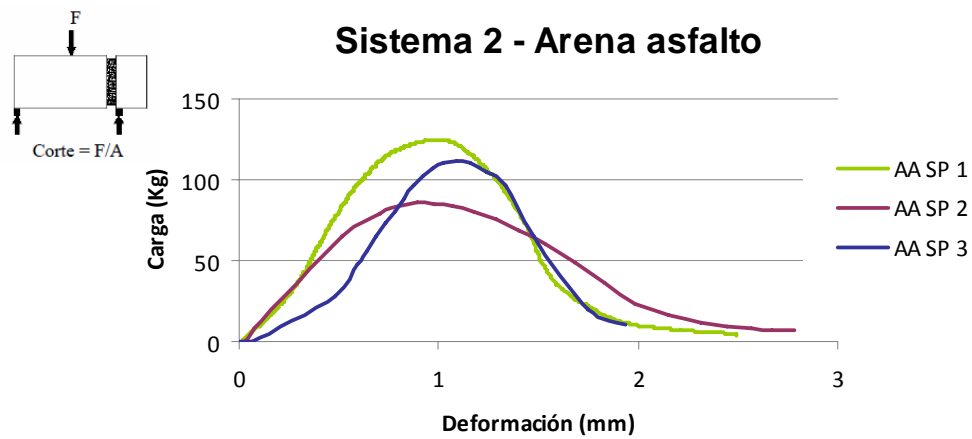


Figura VII.100 Carga vs. deformación para el Sistema 2

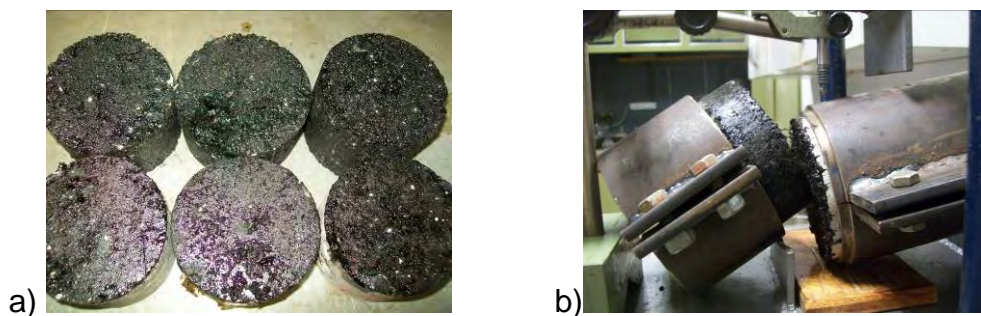


Figura VII.101 a) Sup. del hormigón luego de desprenderse la capa asfáltica; b) Desprendimiento en la interfase hormigón-arena asfalto

Para el Sistema 1 de referencia, las fallas se producen en el plano de discontinuidad de los materiales.



Para el Sistema 2 el desprendimiento se efectúa en la interfase hormigón-arena asfalto, esto demuestra que la unión entre la capa asfáltica con la capa de arena asfalto resulta mayor debido a la afinidad entre los materiales, Figura VII.101b. En este caso dos interfases están trabajando como planos de falla.

VII.3.1.4.2 Modelo con geosintético

En comparación con la serie de probetas anteriores, las probetas ensayadas con el material intermedio demuestran en algunos casos un mejor comportamiento a la adherencia, como se puede observar en las tablas y gráficos de resultados obtenidos y en las fotografías de ilustración.

La Tabla VII.21 presenta los resultados obtenidos para los diferentes sistemas considerados.

Tabla VII.21 Probetas con interposición de geosintéticos

Material	Carga aplicada (Kg)	Carga en la interfase (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
Sistema 3 (AA+HSK PET)	189,81	94,90	0,67	0,11	111,8
Sistema 4 (base fundida)	443,49	221,75	0,79	0,26	306,8
Sistema 4 (base sin fundir)	117,58	58,79	0,62	0,07	61,5
Sistema 5 (MAC PET)	740,84	370,42	0,96	0,44	465,3
Sistema 6 (RBK PET)	194,01	97,01	1,52	0,11	459,7
Sistema 7 (HSK PVA)	442,16	221,08	0,59	0,26	248,0
Sistema 8 (FM PP)	220,39	110,20	1,68	0,13	394,1
Sistema 9 (GR FV)	325,68	162,84	0,50	0,19	161,8
Sistema 10 (Membrana+HSK PET)	428,50	214,25	0,69	0,25	312,2
Sistema 11 (GNT PET 150 g)	109,75	54,88	0,52	0,06	136,4
Sistema 12 (FM PP arena)	409,79	204,90	1,81	0,24	548,8

Nota: los resultados son promedio de tres determinaciones

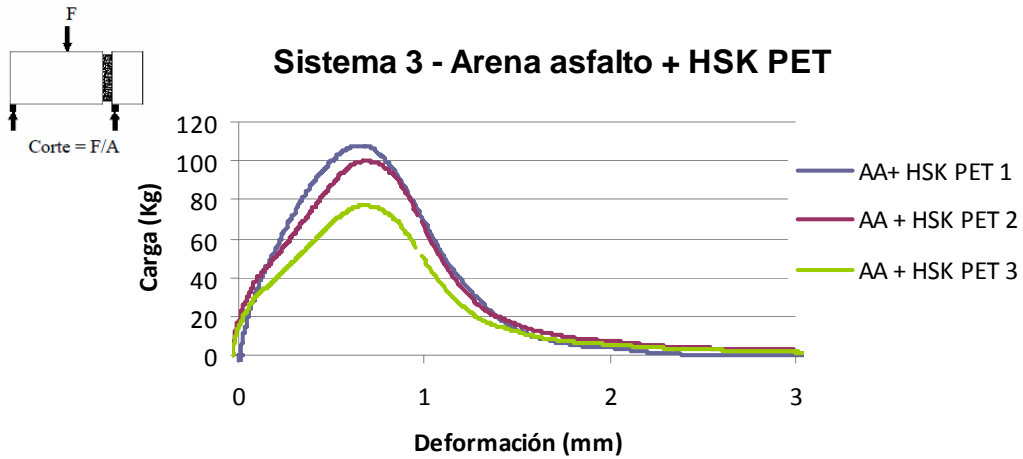


Figura VII.102 Carga vs. deformación para el Sistema 3

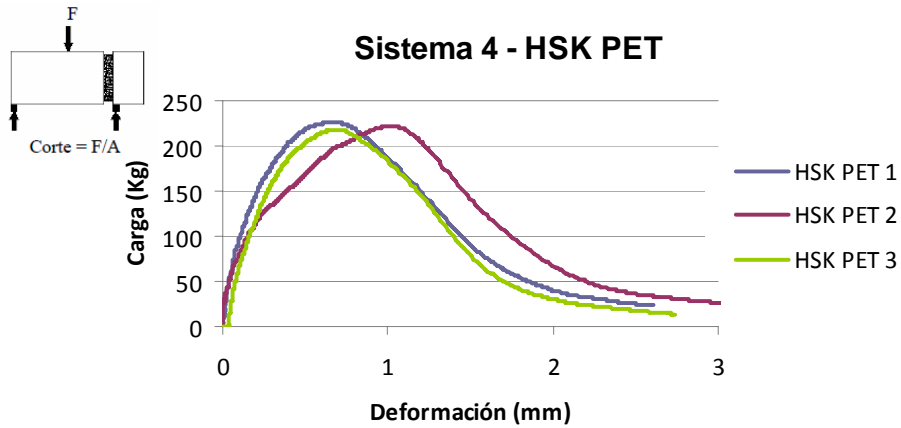


Figura VII.103a Carga vs. deformación para el Sistema 4 base fundida

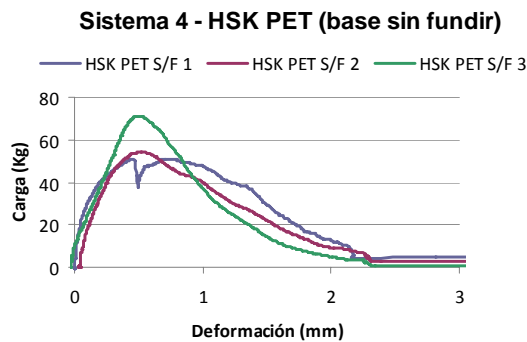


Figura VII.103b Carga vs. deformación para material sin fundir

Figura VII.104 Geotextil de base no fundido



Se observa que para el material HSK PET es importante que el material geotextil agujado en polipropileno, que posee de base, funda a la temperatura de colocación de la mezcla, de lo contrario severamente se vera perjudicada la adherencia entre capas. Lo mismo se concluye para los materiales MAC PET y HSK PVA.

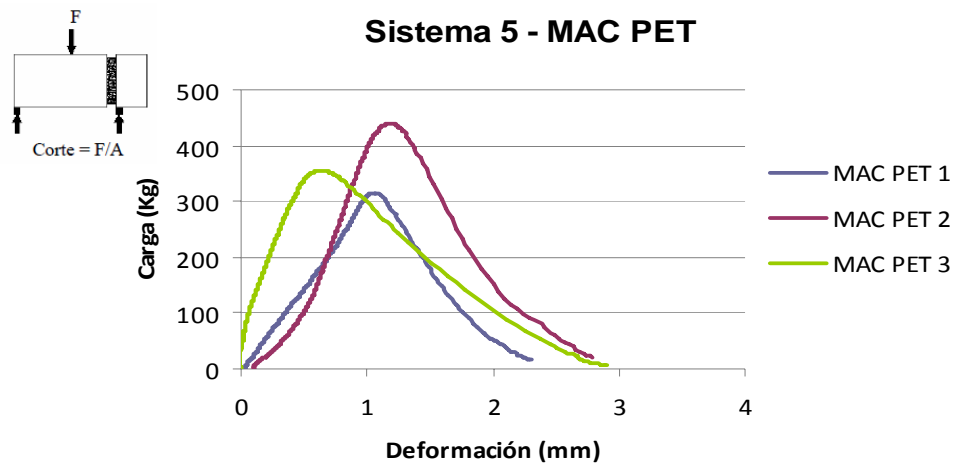


Figura VII.105 Carga vs. deformación para el Sistema 5

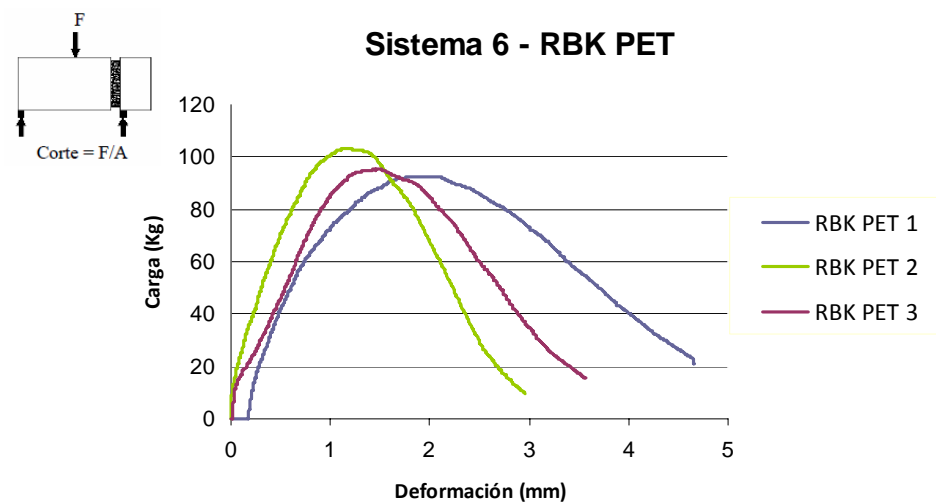


Figura VII.106 Carga vs. deformación para el Sistema 6

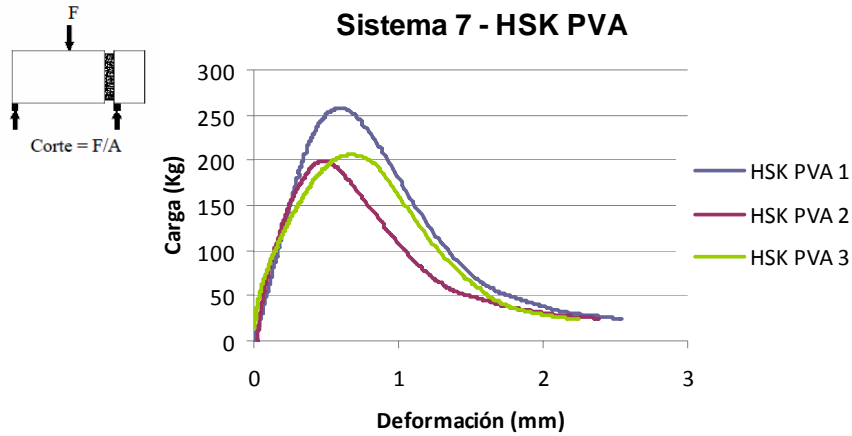
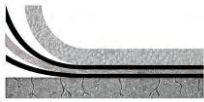


Figura VII.107 Carga vs. deformación para el Sistema 7

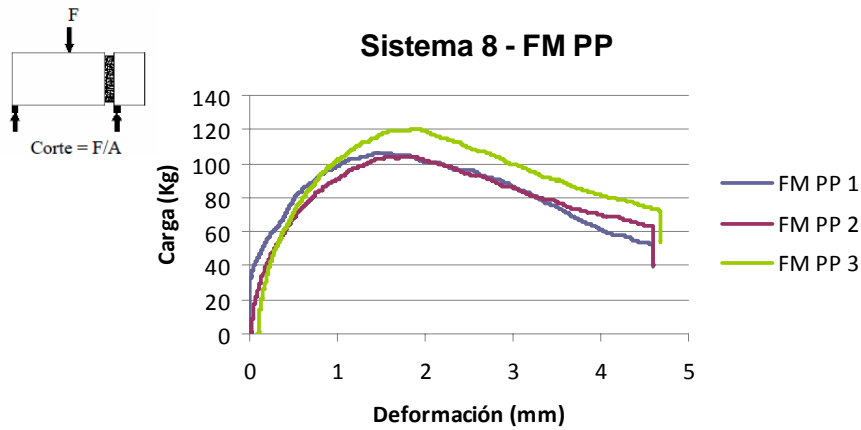


Figura VII.108 Carga vs. deformación para el Sistema 8

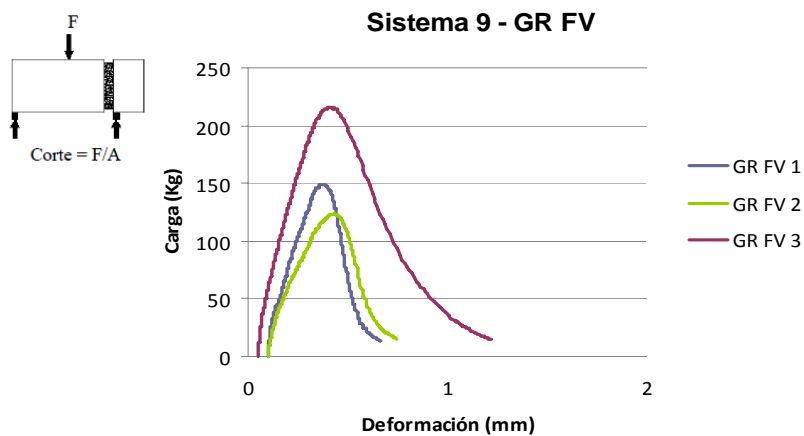


Figura VII.109 Carga vs. deformación para el Sistema 9

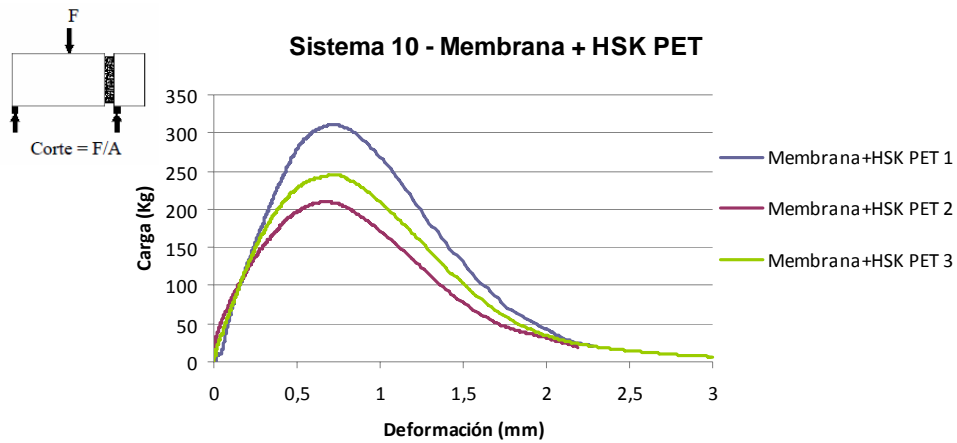
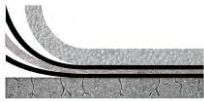


Figura VII.110 Carga vs. deformación para el Sistema 10

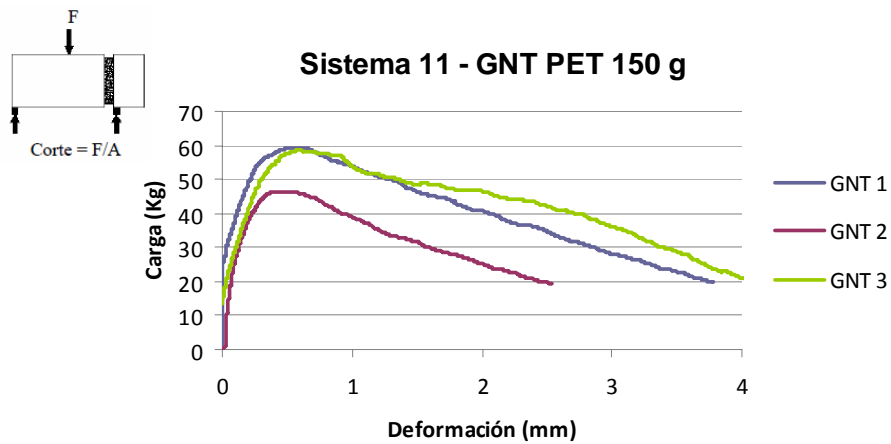


Figura VII.111 Carga vs. deformación para el Sistema 11

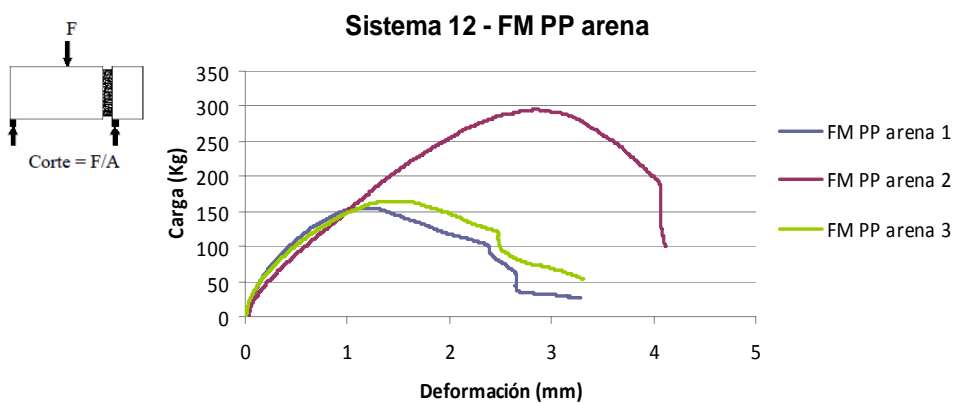
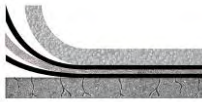


Figura VII.112 Carga vs. deformación para el Sistema 12



Para el Sistema 11 la dotación de riego adoptada es la misma que para los demás sistemas al tener una superficie regular y fijar así este parámetro. Generalmente cuando se utilizan estos materiales a base de fibras no tejidas distribuidas aleatoriamente, la dotación debe ser la óptima según el gramaje del material para formar una barrera impermeable.

Los materiales geosintéticos compuestos por la membrana viscoelástica quedaron adheridos al hormigón, mientras que las grillas de estructura abierta quedaron adheridas a la mezcla asfáltica.

El Sistema 10 Membrana + HSK PET brinda buen resultado a la adherencia observándose la grilla embebida en la membrana y adosada a la capa de hormigón luego de finalizado el ensayo, Figura VII.119.

Las Figuras VII.113 a VII.121 presentan imágenes de los ensayos realizados sobre los diferentes sistemas.



Figura VII.113 Referencia



Figura VII.114 HSK PET



Figura VII.115 FM PP



Figura VII.116 RBK PET

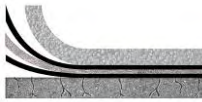


Figura VII.117 MAC PET

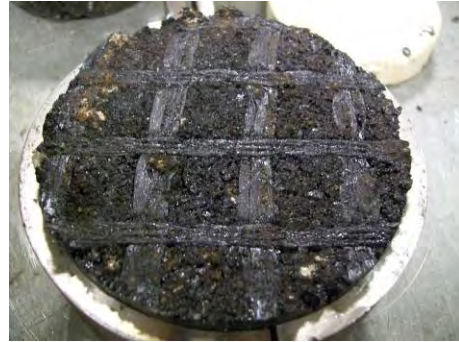


Figura VII.118 GR FV



**Figura VII.119
Membrana + HSK PET**



Figura VII.120 GNT PET 150 g.



Figura VII.121 FM PP arena

Existe una marcada diferencia en el comportamiento según el tipo de material interpuesto; los materiales de malla abierta manifiestan mayores beneficios tomando mayor carga con menor deformación, mientras que los materiales que cubren toda la superficie reducen la resistencia de adherencia en la interfase, aunque ofrecen mayor trabajo al despegue de capas, en comparación con el sistema de referencia, Figura VII.122.

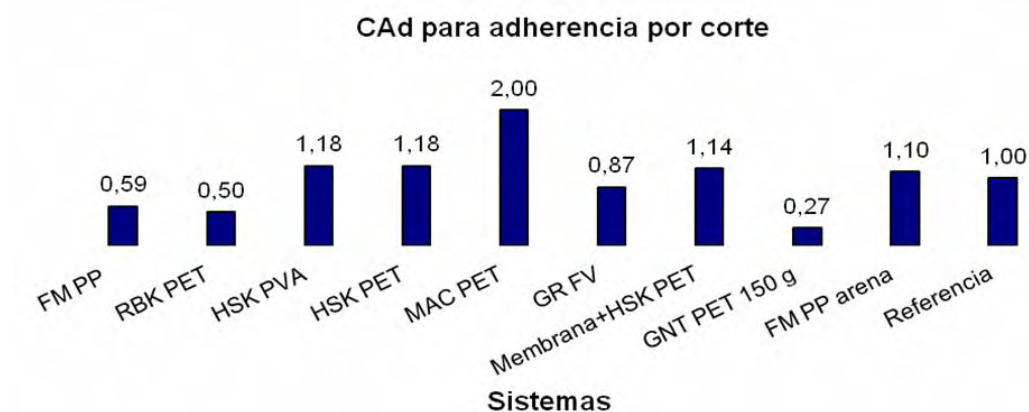


Figura VII.122 Coeficiente de adherencia (CAd) por corte para los diferentes sistemas sobre base de hormigón

VII.3.1.5 Resultados sobre base asfáltica

Como comparativa se realizan algunas experiencias utilizando una base asfáltica y considerando algunos de los sistemas propuestos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla VII.22.

Tabla VII.22 Interposición de geosintéticos sobre base asfáltica

Material	Carga aplicada (Kg)	Carga en la interfase (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
Sistema 13 Referencia	804,62	402,31	1,42	0,47	599,4
Sistema 14 Arena asfalto	616,07	308,03	1,38	0,36	703,9
Sistema 15 HSK PET	554,34	277,17	0,82	0,33	383,9
Sistema 17 FM PP	212,39	106,19	1,50	0,12	306,1
Sistema 19 GNT PET 150 g.	152,60	76,30	1,69	0,09	158,3
Sistema 20 RBK PET	264,96	132,48	3,67	0,15	502,6
Sistema 21 FM PP arena	335,98	167,99	5,98	0,19	896,7

Nota: los resultados son el promedio de tres determinaciones.

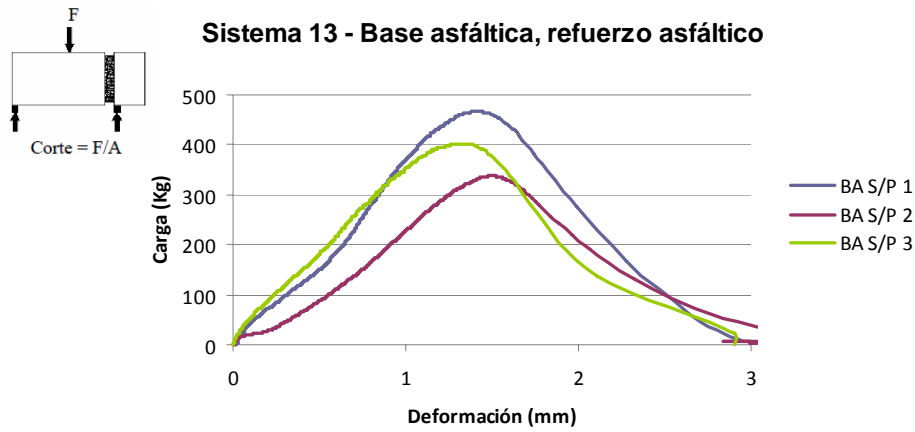
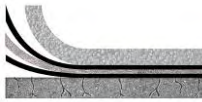


Figura VII.123 Carga vs. deformación para el Sistema 13

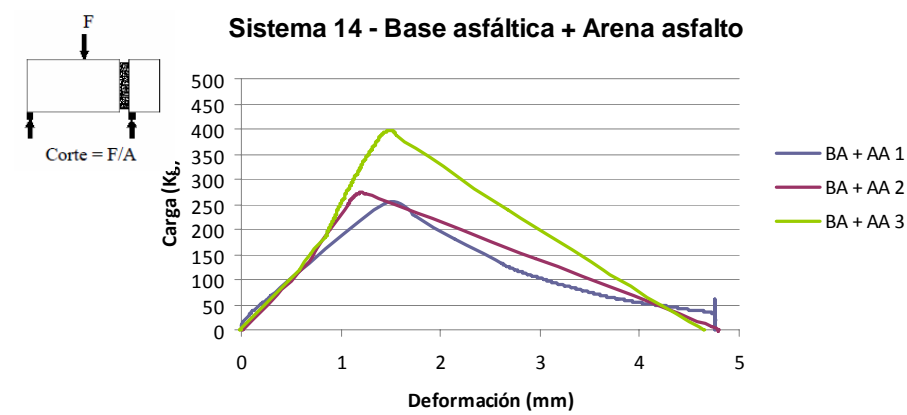


Figura VII.124 Carga vs. deformación para el Sistema 14

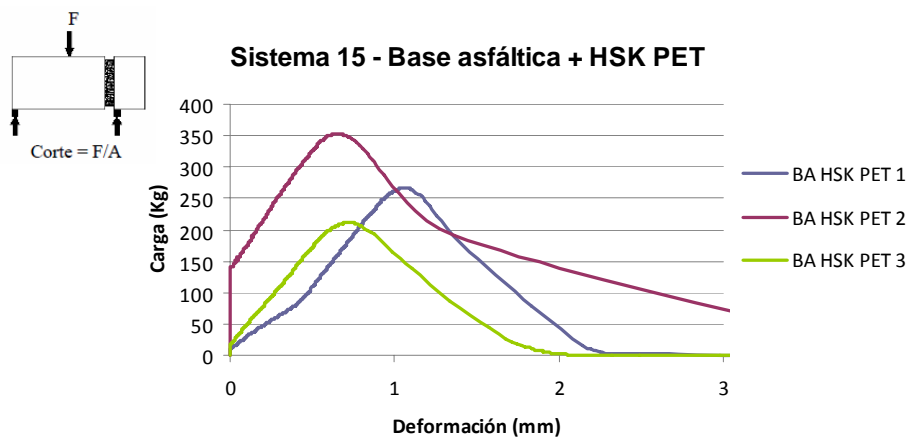


Figura VII.125 Carga vs. deformación para el Sistema 15

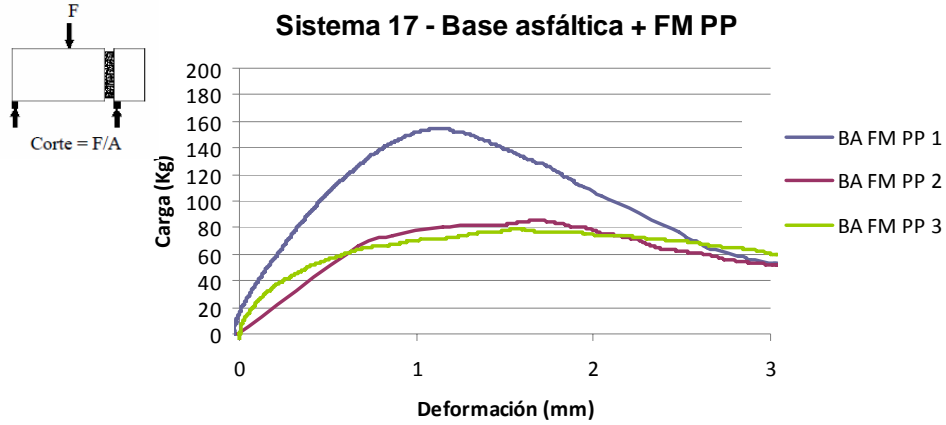


Figura VII.126 Carga vs. deformación para el Sistema 17

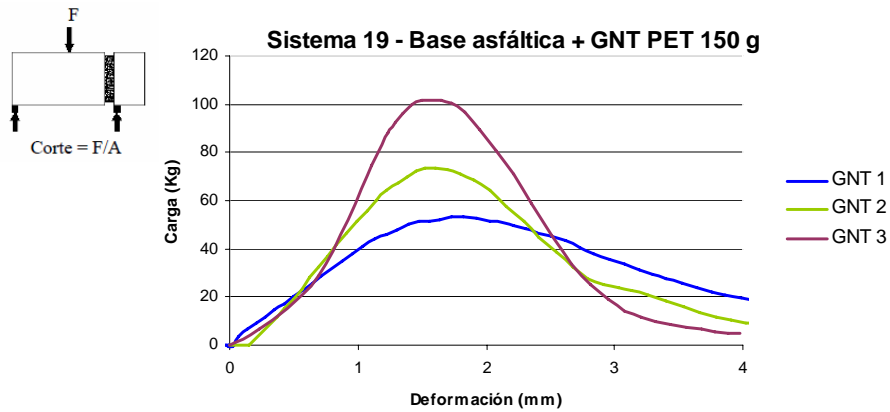


Figura VII.127 Carga vs. deformación para el Sistema 19

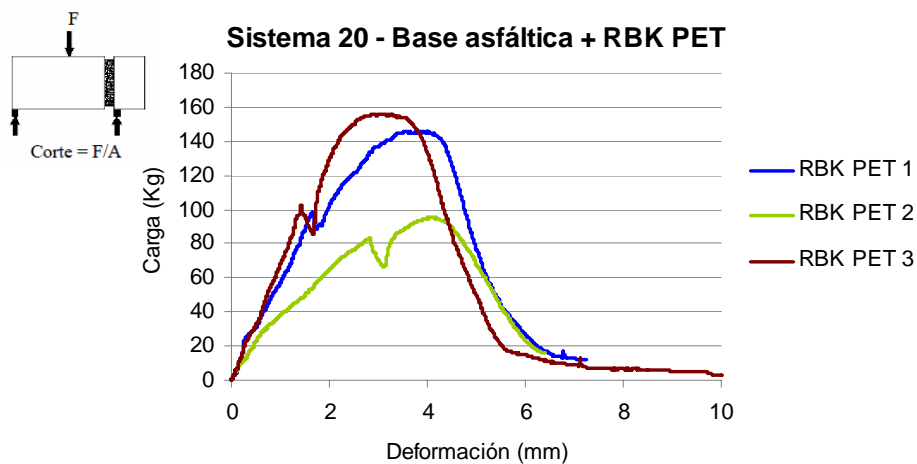


Figura VII.128 Carga vs. deformación para el Sistema 20

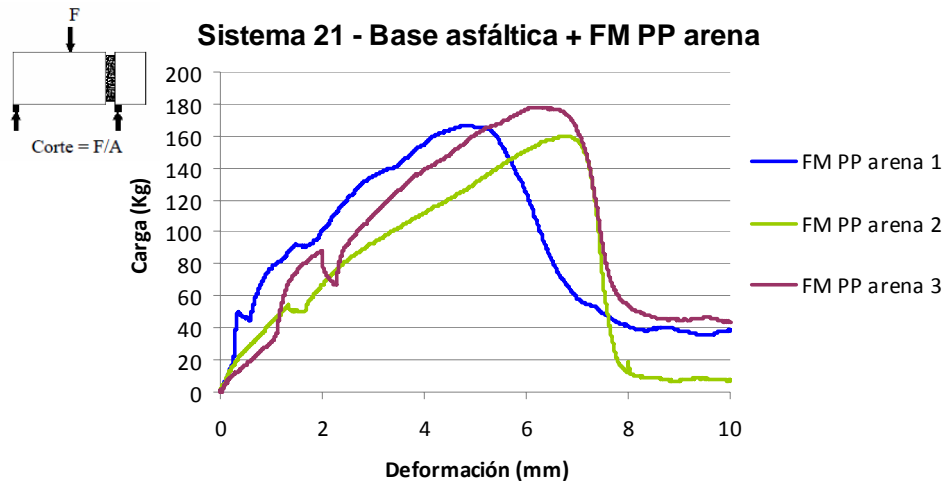
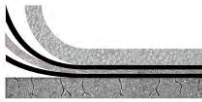


Figura VII.129 Carga vs. deformación para el Sistema 21



Figura VII.130 Referencia



Figura VII.131 Arena asfalto

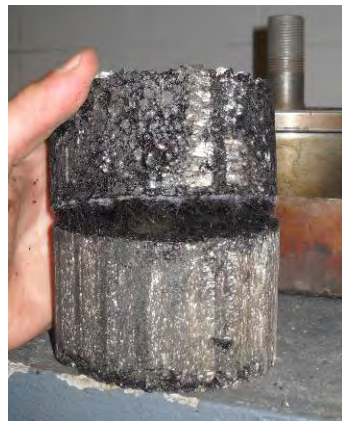


Figura VII.132 GNT PET 150 g.



Figura VII.133 FM PP

Tanto el Sistema 1 como el Sistema 2 trabajan mejor en comparación con la interposición de un material geosintético como puede observarse en los resultados, debido a que las capas presentan mayor afinidad entre si a diferencia de la que se logra con el hormigón.



Entre capas asfálticas la interposición de un material geosintético genera una discontinuidad apreciable reduciendo considerablemente la adherencia y por ende el comportamiento monolítico de la estructura de un pavimento.

Mediante los ensayos realizados se determina un coeficiente de adherencia (CA_d), Tabla VII.23 y Tabla VII.24, comparando la tensión de adherencia de la muestra con material geosintético, con la tensión de adherencia máxima obtenida entre contacto íntimo hormigón/mezcla.

Visto en fórmula matemática sería:

$$CA_d = \frac{\tau Ad_1}{\tau Ad_{\max}}$$

Donde:

CA_d = Coeficiente de Adherencia = (adimensional)

τAd_1 = Tensión de adherencia de la muestra con material = (kg/cm²)

τAd_{\max} = Tensión de adherencia máxima entre contacto íntimo hormigón – mezcla = (kg/cm²)

Tabla VII.23 Coeficiente de adherencia CA_d para base asfáltica

Material	Carga aplicada (Kg)	Tensión (MPa)	Tensión (Kg/cm ²)	CA _d
Sistema 13 (Referencia)	804,59	0,47	4,79	1,00
Sistema 14 (Arena asfalto)	241,76	0,28	2,86	0,60
Sistema 15 (HSK PET)	554,34	0,33	3,36	0,70
Sistema 17 (FM PP)	88,88	0,10	1,02	0,21
Sistema 19 (GNT PET 150 g.)	152,60	0,18	1,84	0,38
Sistema 20 RBK PET	132,48	0,15	1,53	0,32
Sistema 21 FM PP arena	167,99	0,19	1,93	0,40

**Tabla VII.24 Coeficiente de adherencia CAd para base de hormigón**

Material	Carga aplicada (Kg)	Tensión (MPa)	Tensión (Kg/cm ²)	CAd
Sistema 1 (Referencia)	381,53	0,22	2,24	1,00
Sistema 2 (Arena Asfalto)	214,91	0,13	1,32	0,59
Sistema 3 (AA+HSK PET)	189,80	0,11	1,12	0,50
Sistema 4 (HSK PET)	443,48	0,26	2,65	1,18
Sistema 5 (MAC PET)	740,84	0,44	4,48	2,00
Sistema 6 (RBK PET)	194,01	0,11	1,12	0,50
Sistema 7 (HSK PVA)	442,16	0,26	2,65	1,18
Sistema 8 (FM PP)	220,38	0,13	1,32	0,59
Sistema 9 (GR FV)	325,67	0,19	1,94	0,87
Sistema 10 (Membrana+HSK PET)	510,31	0,25	2,55	1,14
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	109,68	0,06	0,61	0,27
Sistema 12 (FM PP arena)	409,79	0,24	2,48	1,10

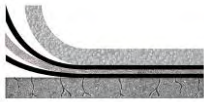
VII.3.1.6 Ensayos de adherencia para diferente abertura de malla

Buscando responder algunas consideraciones evidenciadas en los ensayos de adherencia, se decide implementar probetas de mayor diámetro modificando la abertura de la malla de uno de los materiales geosintéticos considerados como sistema anti-fisura.

VII.3.1.6.1 Confección de probetas

Se confeccionan serie de tres probetas de 150 mm de diámetro, las cuales son moldeadas por capas de hormigón de 50 mm de espesor, sobre las que se aplica una dotación de 0,9 l/m² de emulsión ECRR-M, se coloca el material geosintético y se compacta la mezcla asfáltica CAC D20 a 160 °C, mediante el quipo de compactación Metabo (a velocidad 7) compactando durante 3 minutos, Figura VII.136.

Se selecciona el material geosintético MAC PET para las experiencias tomándose abertura de malla variable con objeto de analizar la



adherencia alcanzada al variar la superficie de contacto entre capas, Figura VII.134 y VII.135. Como comparativa se moldea el sistema de referencia que no incorpora ningún material geosintético en la interfase.



Figura VII.134 Confección de probetas



Figura VII.135 Disposición de probeta en el molde



Figura VII.136 moldeo de probeta



Figura VII.137 Probetas moldeadas

VII.3.1.6.2 Procedimiento de ensayo

Para la ejecución del ensayo se diseñan las mordazas para aplicar un esfuerzo de corte mediante la maquina a tracción EMIC DL 10000, Figura VII.138, la cual es programada a una velocidad de ensayo de 1,27 mm/min, al igual que los ensayos de corte mediante el dispositivo LCB.

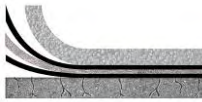


Figura VII.138 Disposición de la probeta en el equipo de ensayo

VII.3.1.6.3 Resultados

Los resultados de adherencia considerando distintas aberturas de malla del material MAC PET se presentan en la Tabla VII.25.

Tabla VII.25 Adherencia para MAC PET con diferente abertura de malla

Material	Carga en la interfase (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
REFERENCIA	73,73	2,72	0,06	141,73
MAC PET 20x20 mm	139,64	3,88	0,11	402,94
MAC PET 30x30 mm	143,12	6,64	0,11	626,43
MAC PET 40x40 mm	169,40	5,05	0,14	511,85
MAC PET 60x60 mm	118,23	2,41	0,09	229,73
MAC PET 120x70 mm	111,09	2,92	0,09	234,90

Nota: los resultados son promedio de tres determinaciones.

Las Figuras VII.139 a VII.144 muestran las graficas obtenidas del ensayo de adherencia por corte.

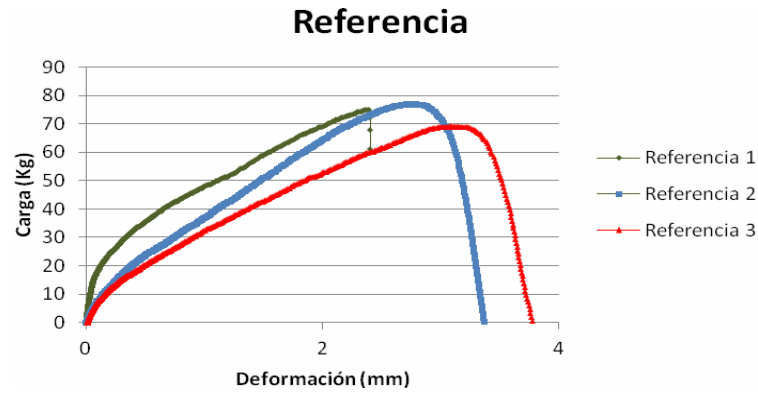


Figura VII.139 Adherencia por corte, probetas de referencia

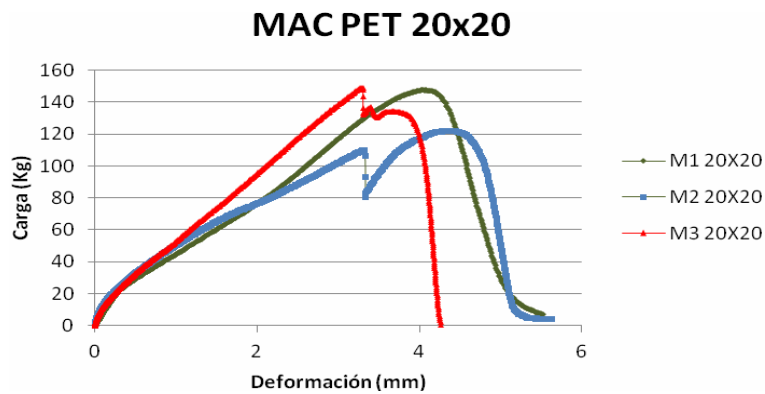


Figura VII.140 Adherencia por corte, abertura de malla 20x20 mm

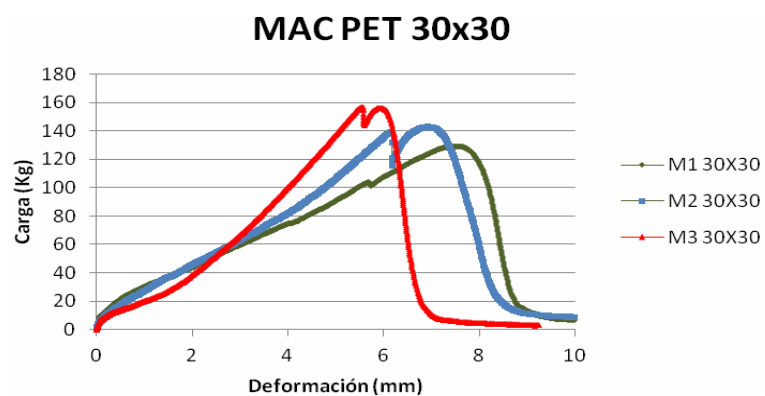


Figura VII.141 Adherencia por corte, abertura de malla 30x30 mm



MAC PET 40x40

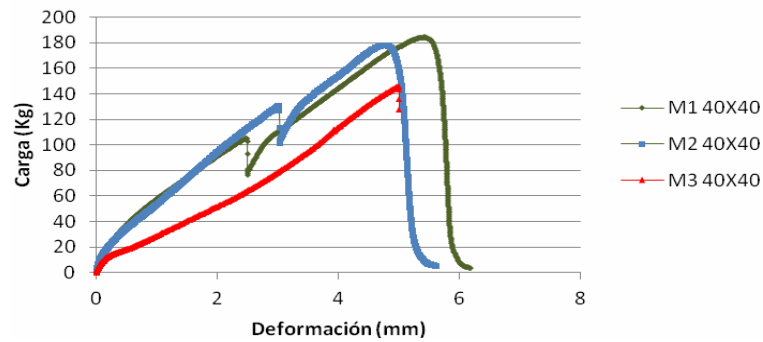


Figura VII.142 Adherencia por corte, abertura de malla 40x40 mm

MAC PET 60x60

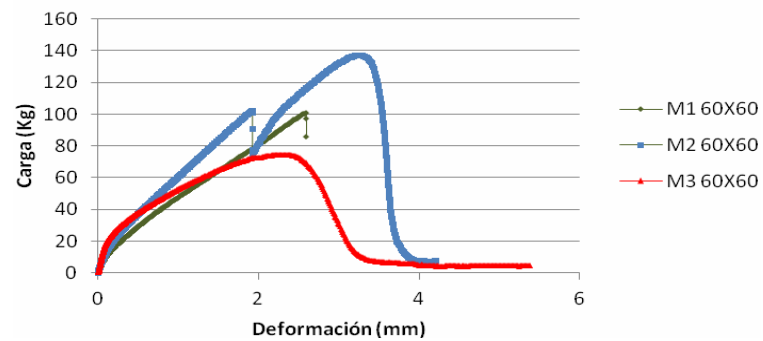


Figura VII.143 Adherencia por corte, abertura de malla 60x60 mm

MAC PET 120x70

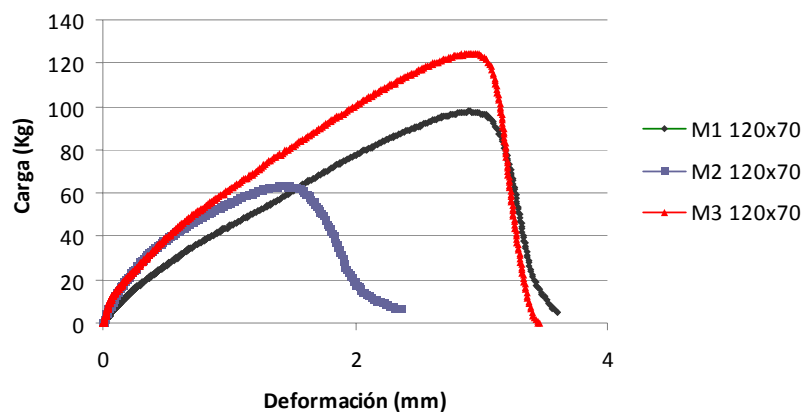


Figura VII.144 Adherencia por corte, abertura de malla 120x70 mm

Para la Figura VII.143 y Figura VII.144 los cálculos se realizan considerando las dos curvas más representativas.

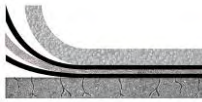


Figura VII.145 Abertura 20x20



Figura VII.146 Abertura 30x30



Figura VII.147 Abertura 40x40



Figura VII.148 Abertura 60x60



Figura VII.149 Abertura 110x70

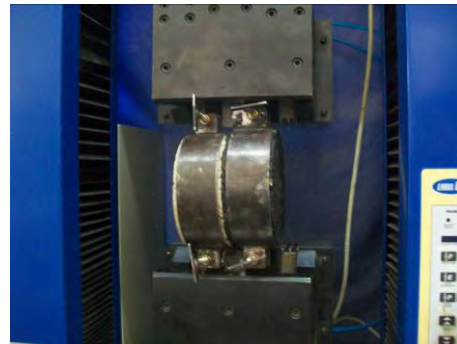


Figura VII.150 Ejecución del ensayo

La Figura VII.151 presenta los resultados obtenidos de adherencia por corte variando la abertura de malla del material MAC PET en la cual puede observarse que se obtiene la mayor performance del material para una abertura de 40x40 mm.



Adherencia para diferente abertura de malla

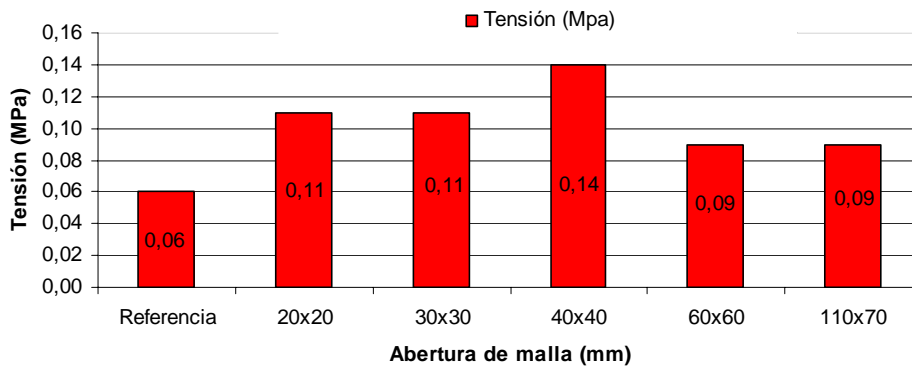


Figura VII.151 Adherencia para diferente abertura de malla considerando el material MAC PET

Se piensa que cuanto mayor es el diámetro de las probetas o testigos ensayados, más representativas son las determinaciones; esto debe tenerse presente ya que los resultados de adherencia por corte (ensayo LCB) realizados sobre probetas de menor diámetro, ofrecieron valores superiores, Figura VII.152.

Adherencia por corte para diferente diámetro de probeta

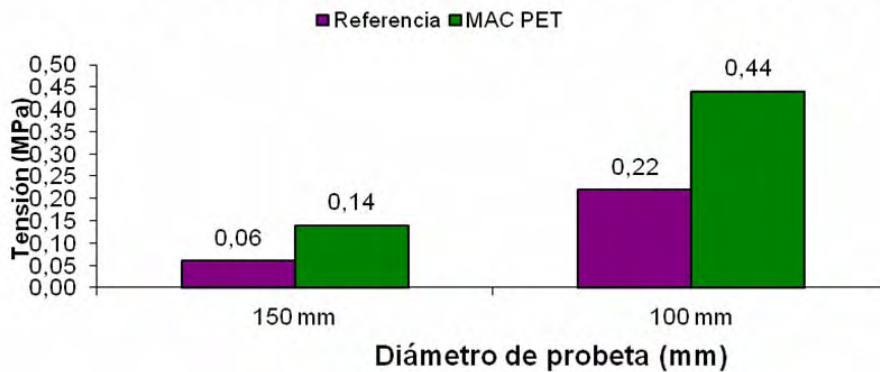
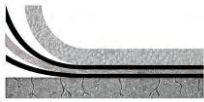


Figura VII.152 Adherencia por corte para diferente diámetro de probeta

VII.3.1.7 Análisis de adherencia por corte

Los ensayos de adherencia por corte muestran variaciones en los resultados. En la mayoría de los sistemas con base de hormigón, el



material geosintético MAC PET a base de fibras en poliéster fue es el que brinda mayor resistencia cuando se utiliza una emulsión asfáltica modificada (este material tiene mayor espesor), seguidos por los materiales HSK PET y HSK PVA que poseen las mismas características en cuanto a su estructura.

Cuando el material geotextil no tejido en polipropileno no funde, base de estos materiales, se evidencia una notable disminución de la adherencia.

Sobre la base de hormigón, los sistemas que ofrecen un beneficio son aquellos conformados por una malla abierta, esto puede atribuirse al bloqueo que se genera entre las fibras del material y la rugosidad superficial de las capas. Para este caso los materiales que cubren toda la superficie generan una reducción en la adherencia.

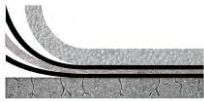
En el caso de introducir los materiales entre capas asfálticas, todos los sistemas reducen la adherencia en comparación con el sistema de referencia considerado para este caso, Sistema 13.

La adherencia entre capas asfálticas es 10,4 veces superior a la lograda por el sistema hormigón/capa asfáltica, esto se debe a la afinidad entre los materiales.

Los modos de fallo de la interfase se producen de diferentes maneras.

Para el material HSK PET colocado entre una capa de arena asfalto y una capa asfáltica, la rotura se produce de acuerdo al comportamiento del geotextil no tejido en polipropileno con la temperatura de la mezcla asfáltica. En el caso donde el material de base en polipropileno no funde, el desprendimiento se produce en la interfaz arena asfalto-geosintético. Cuando el material funde permitiendo el contacto entre capas, el desprendimiento se genera en la interfaz hormigón-arena asfalto.

En los ensayos para diferente abertura de malla se evidencia que la interposición de un geosintético de malla abierta mejora la adherencia en comparación con el sistema de referencia; ahora bien, se observa que el



mejor comportamiento a la adherencia se obtiene para la abertura de malla de 40x40 mm. La Figura VII.154 muestra el gráfico donde se presenta la variación de la adherencia entre capas a medida que la abertura de malla del material MAC PET se incrementa.

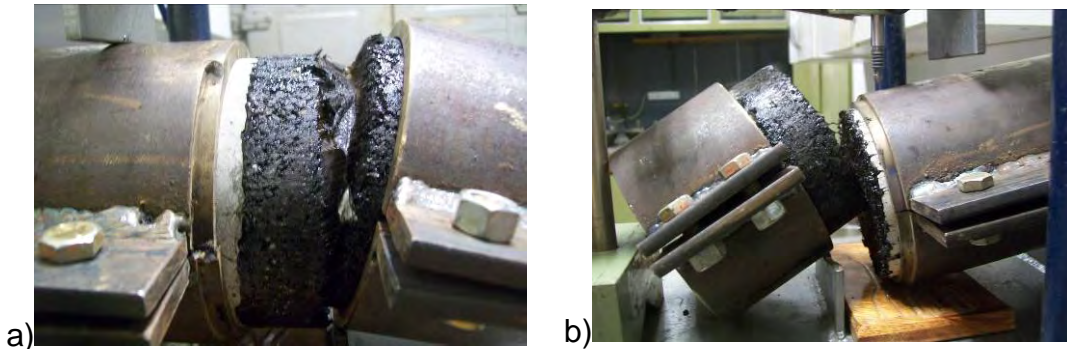


Figura VII.153 modo de fallo AA + HSK PET

a) fallo interfaz arena asfalto-mezcla; b) fallo interfaz hormigón-arena asfalto

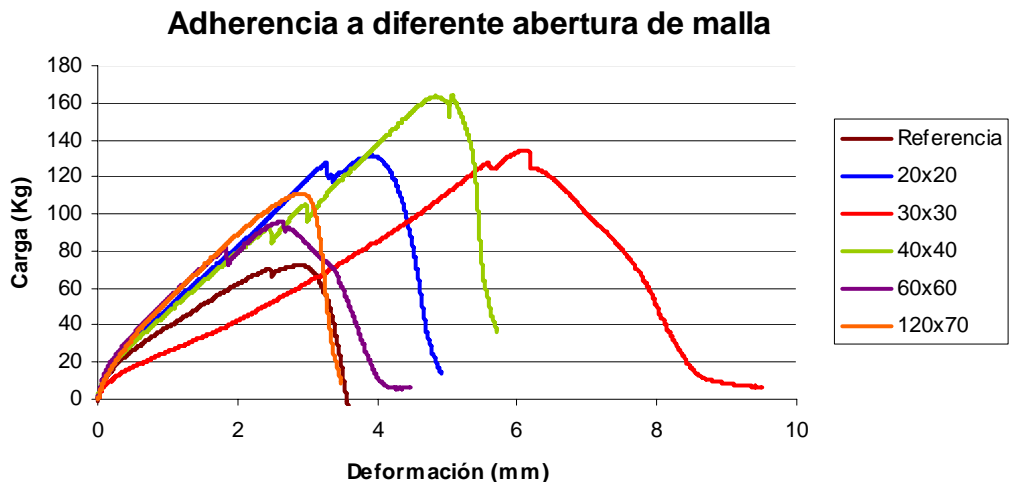
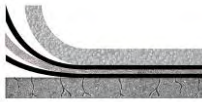


Figura VII.154 Variación de la adherencia con la abertura de malla

Pensando en la influencia del espesor de los diferentes materiales, puede observarse en la Figura VII. 155 que para aquellos materiales de malla cerrada (FM PP arena, FM PP, RBK PET y GNT PET 150 g.) la adherencia se ve reducida a medida que el espesor del material disminuye, pero en este caso los materiales tienen diferente conformación por lo que no puede concluirse que el espesor sea la causa.



Sin embargo, para los materiales de malla abierta (MAC PET, HSK PET, HSK PVA y GR FV) puede verse que la carga necesaria para desprender las capas es bastante pareja, existiendo dos extremos: para el material MAC PET de abertura de malla de 40x40 mm, el espesor juega un papel importante brindando mayor anclaje con los materiales, mientras que para el material GR FV de abertura de malla de 20x20 mm se necesita menor carga para desvincular los materiales, siendo el espesor casi la mitad del material MAC PET.

Para los materiales HSK PET y HSK PVA de misma abertura de malla, conformación y espesor, la fuerza necesaria es similar, mientras que para el material diseñado Membrana+HSK PET que genera una malla continua entre los materiales, la fuerza necesaria para desprender las capas es levemente inferior que para el material de malla abierta HSK PET, y muy superior en comparación con aquellos materiales conformados por una membrana que cubren toda la superficie, lográndose de esta manera un comportamiento y rendimiento satisfactorio del material con la ventaja de impermeabilizar la capa inferior.

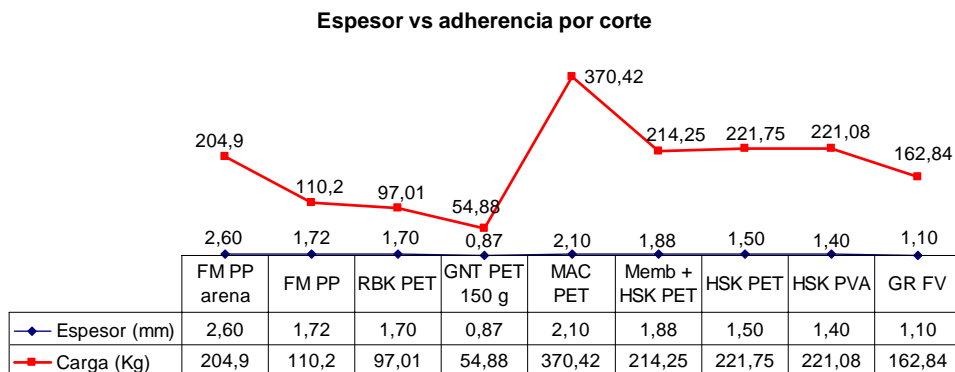
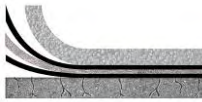


Figura VII.155 Espesor de los materiales en función de la adherencia para el ensayo de corte por flexión (LCB)

Realizando un análisis de la adherencia, podemos decir que los materiales geosintéticos ofrecen desventajas cuando se los coloca entre capas de un pavimento, Figura VII. 156.



Sin embargo, algunos materiales colocados entre una losa de hormigón y una capa asfáltica como ser: Membrana+HSK PET, HSK PVA, HSK PET, MAC PET y FM PP arena, brindan beneficios satisfactorios en comparación con el sistema de referencia, Tabla VII.24.

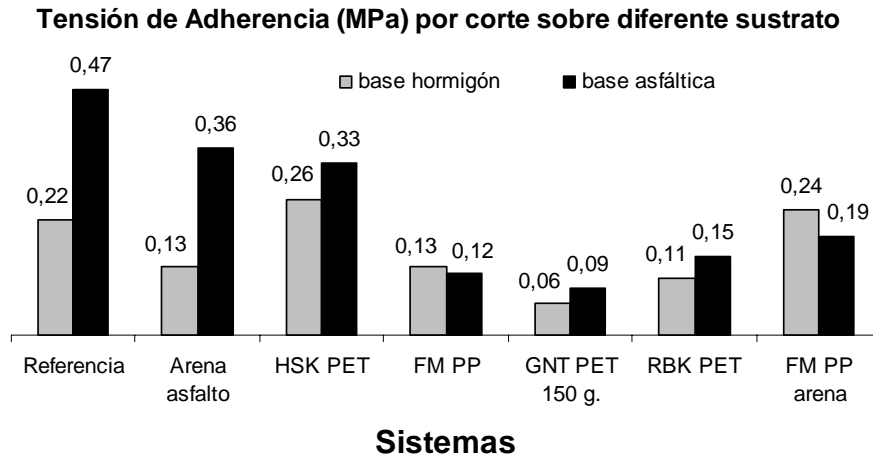


Figura VII.156 Comportamiento a la adherencia por corte de los geosintéticos entre diferentes capas

Las Figuras VII.157 y VII.158 muestran la adherencia por corte alcanzada por los diferentes sistemas, sobre una base de hormigón y una base asfáltica respectivamente.

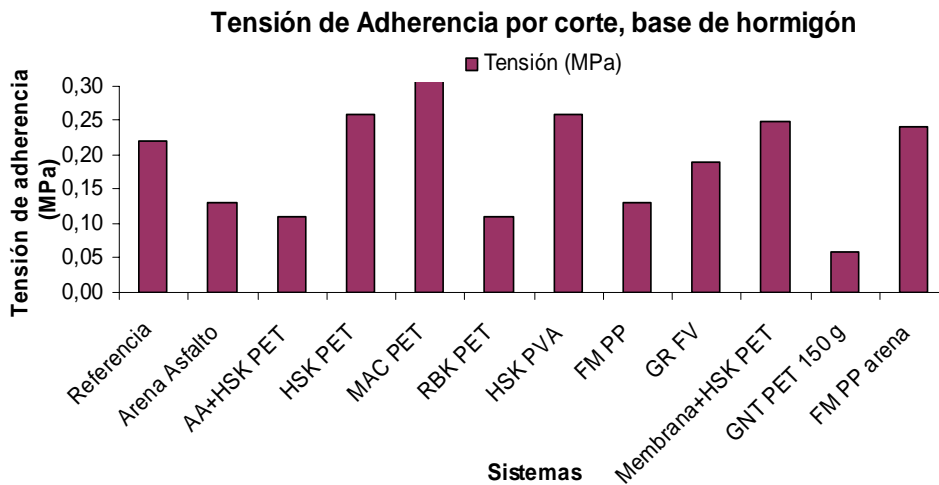


Figura VII.157 Adherencia por corte sobre base de hormigón

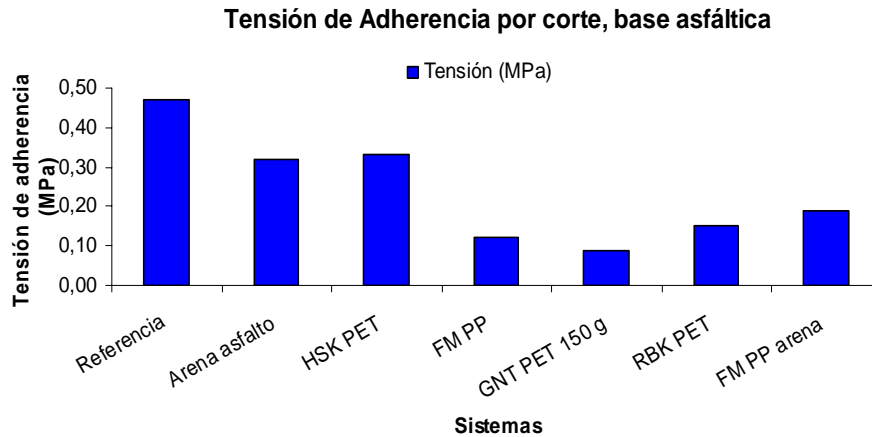


Figura VII.158 Adherencia por corte sobre base asfáltica

VII.3.2 Adherencia mediante tracción directa LEMaC

Otro de los ensayos implementados para determinar la adherencia entre capas, analizando el comportamiento de los materiales, es el ensayo a tracción directa sobre probetas cilíndricas de dimensiones y condiciones similares a las confeccionadas para el ensayo de corte LCB. Para la ejecución del ensayo se implementan las mordazas para la sujeción de la probeta y ajuste a las mordazas del equipo de tracción EMIC DL 10000, Figura VII.171.

VII.3.2.1 Confección de probetas

La confección de las probetas y la secuencia de moldeo, se realiza de manera similar que para las probetas confeccionadas para el ensayo de adherencia por corte LCB.

VII.3.2.2 Procedimiento de ensayo

Se realiza el ensayo a tracción directa ajustando la velocidad de la máquina a 1,27 mm/min. al igual que la velocidad de adherencia por corte. Se colocan las probetas en las mordazas, ajustándolas de forma tal



que no se produzcan desplazamientos entre la probeta y la mordaza, de manera que no alteren los resultados del ensayo.

Los ensayos son realizados a una temperatura de 22 +/- 2 °C y a una humedad relativa de 63%.

La tensión de tracción promedio se obtiene dividiendo la carga máxima por la sección de la probeta, y el trabajo se obtiene como el área bajo la curva carga versus deformación.

VII.3.2.3 Resultados para sistemas sin geosintético

La Tabla VII.26 muestra los resultados obtenidos.

Tabla VII.26 Adherencia por tracción, sistemas sin geosintéticos

Material	Carga máx. (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
Sistema 1 (Referencia)	46,14	0,529	0,054	268,44
Sistema 2 (Arena Asfalto)	14,65	0,249	0,017	24,08

Sistema 1 - Referencia

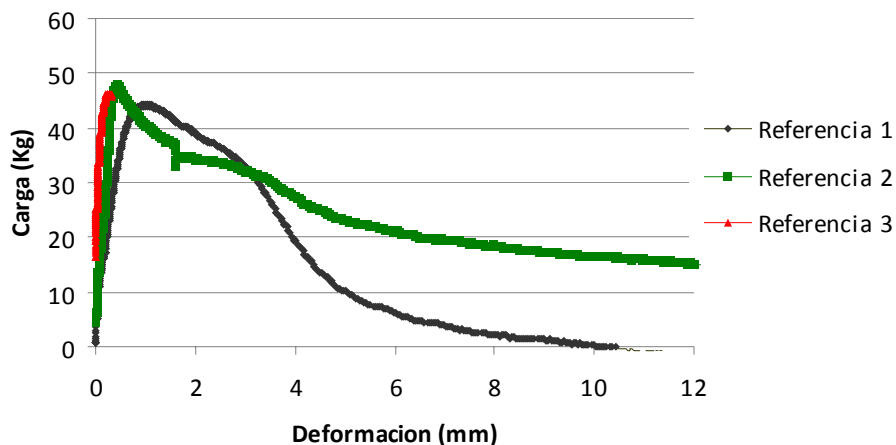


Figura VII.159 Adherencia por tracción para el Sistema 1



Sistema 2 - Arena Asfalto

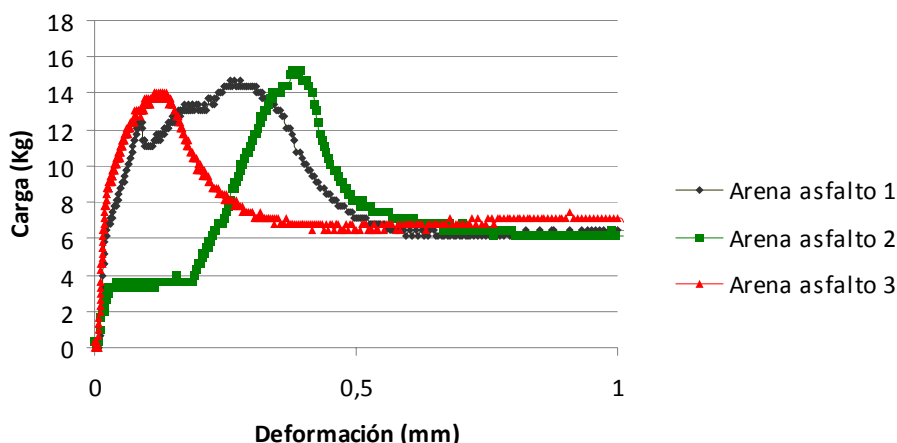


Figura VII.160 Adherencia por tracción para el Sistema 2

VII.3.2.4 Resultados para sistemas con geosintético

La Tabla VII.27 muestra los resultados obtenidos.

Tabla VII.27 Tabla resumen de adherencia por tracción (base de hormigón)

Material	Carga máx. (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
Sistema 3 (AA + HSK PET)	46,15	0,54	0,054	65,48
Sistema 4 (HSK PET sin fundir)	98,71	1,55	0,100	249,68
Sistema 5 (MAC PET)	215,44	1,92	0,253	641,19
Sistema 6 (RBK PET)	182,10	2,52	0,187	540,14
Sistema 7 (HSK PVA)	209,68	1,87	0,246	507,60
Sistema 8 (FM PP)	166,90	1,15	0,168	314,45
Sistema 9 (GR FV)	89,26	1,07	0,105	112,51
Sistema 10 (Membrana+HSK PET)	105,22	1,19	0,123	191,11
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	90,78	1,60	0,106	349,51
Sistema 12 (FM PP arena)	309,70	2,89	0,364	777,53

Nota: Los resultados son promedio de tres determinaciones



Sistema 3 - AA+HSK PET

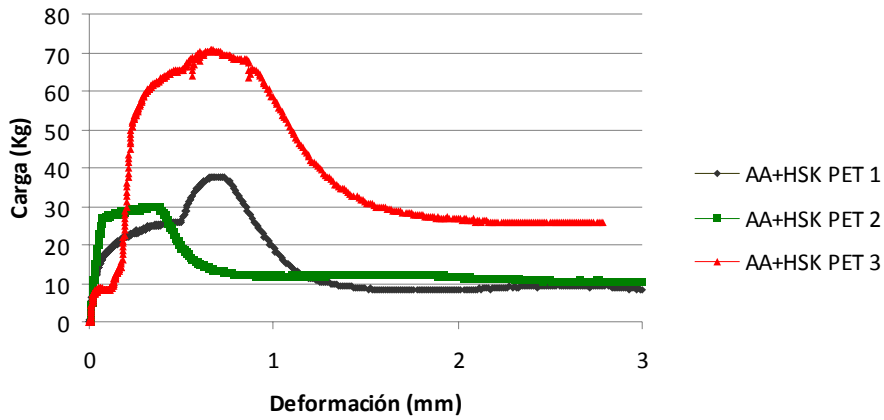


Figura VII.161 Adherencia por tracción para el Sistema 3

Sistema 4 - HSK PET

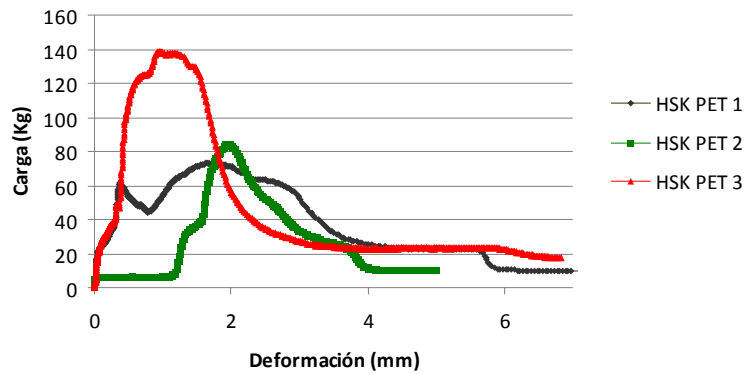


Figura VII.162 Adherencia por tracción para el Sistema 4

Sistema 5 - MAC PET

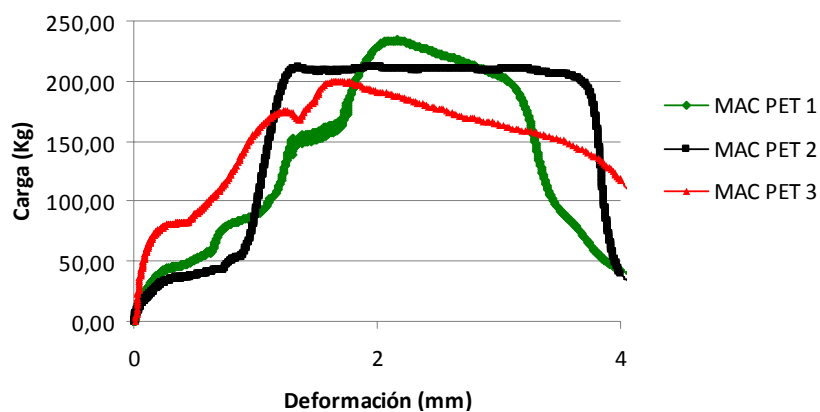
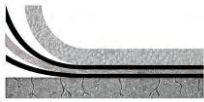


Figura VII.163 Adherencia por tracción para el Sistema 5



Sistema 6 - RBK PET

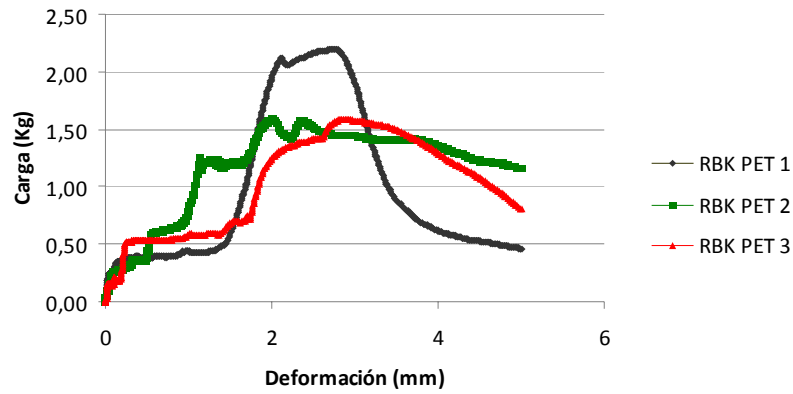


Figura VII.164 Adherencia por tracción para el Sistema 6

Sistema 7 - HSK PVA

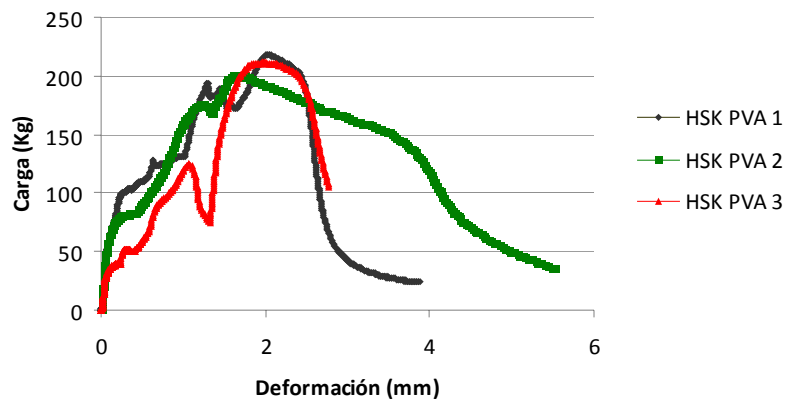


Figura VII.165 Adherencia por tracción para el Sistema 7

Sistema 8 - FM PP

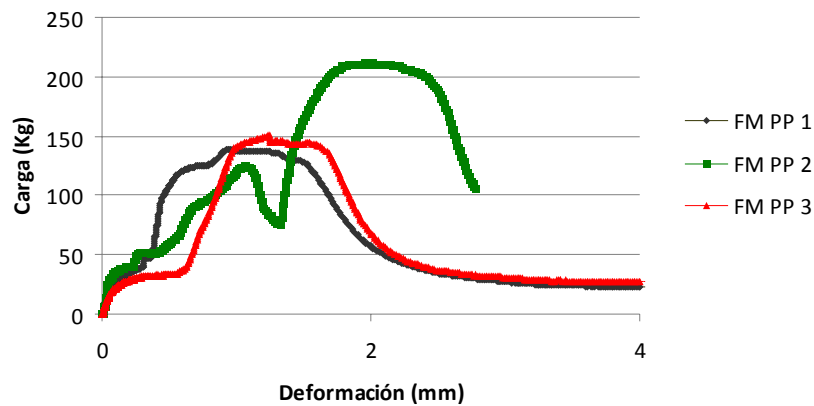
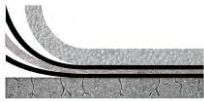


Figura VII.166 Adherencia por tracción para el Sistema 8



Sistema 9 - GR FV

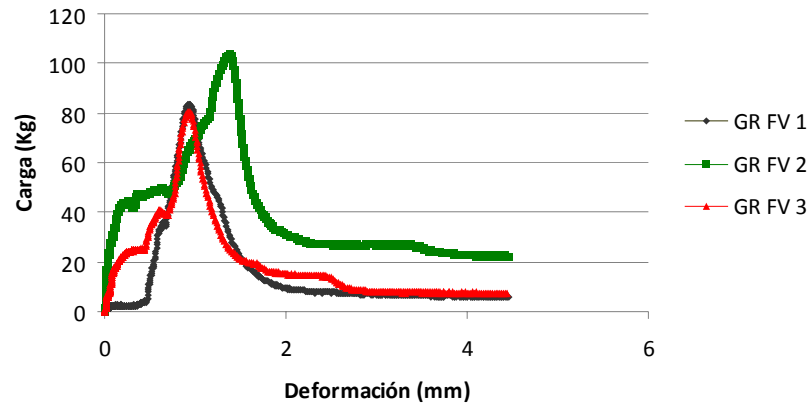


Figura VII.167 Adherencia por tracción para el Sistema 9

Sistema 10 - Membrana+HSK PET

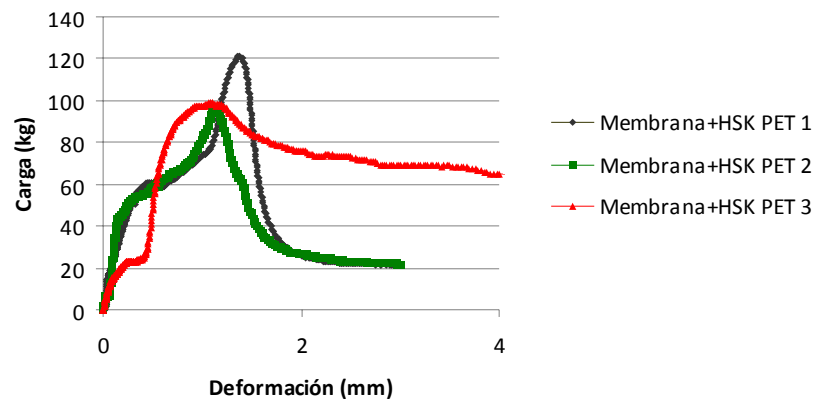


Figura VII.168 Adherencia por tracción para el Sistema 10

Sistema 11 - MAC PET 150 gr.

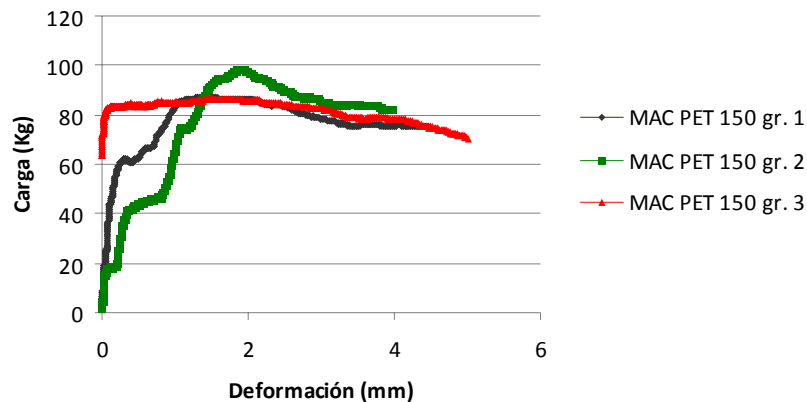
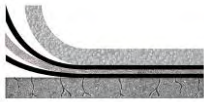


Figura VII.169 Adherencia por tracción para el Sistema 11



Sistema 12 - FM PP arena

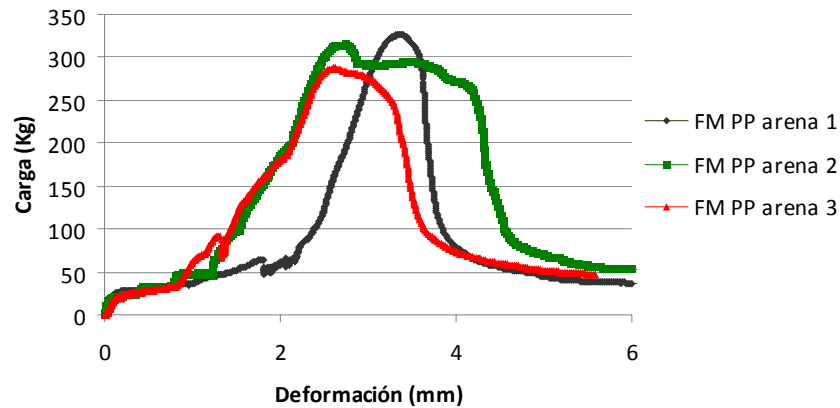


Figura VII.170 Adherencia por tracción para el Sistema 12

La Tabla VII.28 presenta los Coeficientes de adherencia CAd ofrecido por los diferentes sistemas sobre base de hormigón.

Tabla VII.28 Coeficiente de adherencia CAd para base de hormigón

Material	Carga aplicada (Kg)	Tensión (MPa)	Tensión Kg/cm ²	CAd
Sistema 1 (Referencia)	46,14	0,054	0,55	1,00
Sistema 2 (Arena Asfalto)	14,65	0,017	0,18	0,32
Sistema 3 (Arena Asfalto + HSK PET)	46,15	0,054	0,55	1,00
Sistema 4 (HSK PET)	85,45	0,101	1,03	1,85
Sistema 5 (MAC PET)	215,16	0,253	2,58	4,66
Sistema 6 (RBK PET)	158,87	0,187	1,91	3,44
Sistema 7 (HSK PVA)	209,65	0,246	2,51	4,53
Sistema 8 (FM PP)	143,06	0,168	1,71	3,09
Sistema 9 (GR FV)	89,22	0,105	1,07	1,93
Sistema 10 (Membrana + HSK PET)	105,23	0,123	1,25	2,27
Sistema 11 (GNT PET 150 g.)	90,75	0,106	1,08	1,95
Sistema 12 (FM PP arena)	309,89	0,364	3,64	6,61



Figura VII.171 Mezcla asfáltica



Figura VII.172 Arena asfalto



Figura VII.173 RBK PET



Figura VII.174 FM PP



Figura VII.175 HSK PET



Figura VII.176 GR FV



Figura VII.177 MAC PET



Figura VII.178 Referencia

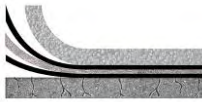


Figura VII.179 Membrana + HSK PET



Figura VII.180 GNT PET 150 g.



Figura VII.181 AA + HSK PET con base no fundida



Figura VII.182 FM PP arena

VII.3.2.5 Resultados sobre base asfáltica

Como comparativa se realizan algunas experiencias considerando una base asfáltica. Los resultados se presentan en la Tabla VII.29.

Tabla VII.29 Tabla resumen de adherencia por tracción (base asfáltica)

Material	Carga aplicada (Kg)	Deformación a carga máx. (mm)	Tensión a carga máx. (MPa)	Trabajo (Kg.mm)
Sistema 13 (Referencia)	433,81	2,482	0,516	986,06
Sistema 15 (HSK PET)	234,39	1,377	0,281	342,80
Sistema 16 (MAC PET)	204,97	1,946	0,240	268,76
Sistema 17 (FM PP)	173,20	1,612	0,203	315,11
Sistema 19 (GNT PET 150 g)	154,20	0,985	0,181	247,06

Nota: Para el Sistema 15 se toma el promedio de las dos curvas más representativas.

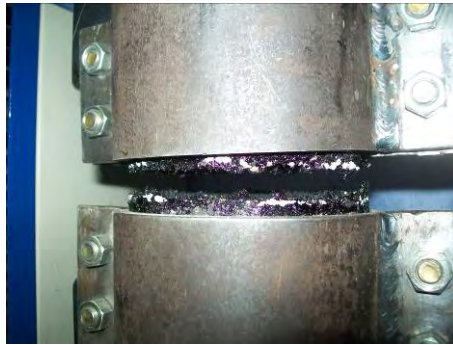
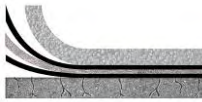


Figura VII.183 Referencia



Figura VII.184 FM PP



Figura VII.185 HSK PET



Figura VII.186 GNT PET 150 g

Las gráficas presentadas en las Figuras VII.187 a VII.191 permiten observar el comportamiento de los sistemas. La Tabla VII.30 presenta el coeficiente de adherencia ofrecido por los mismos.

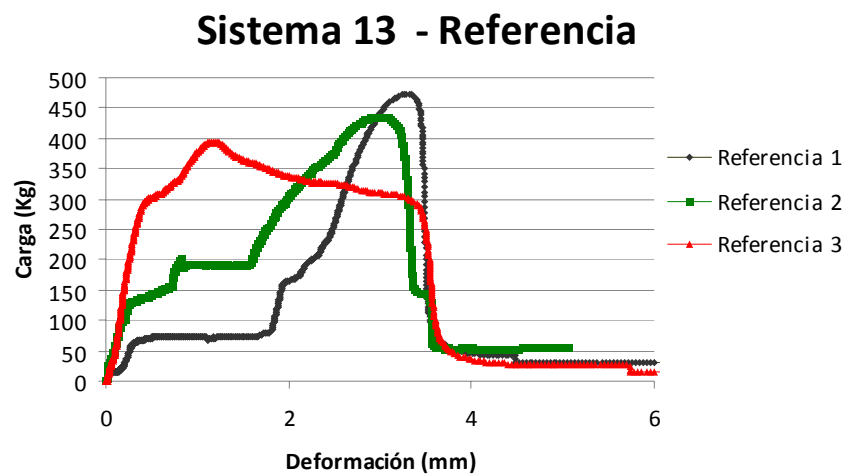


Figura VII.187 Adherencia por tracción para el Sistema 13



Sistema 15 - HSK PET

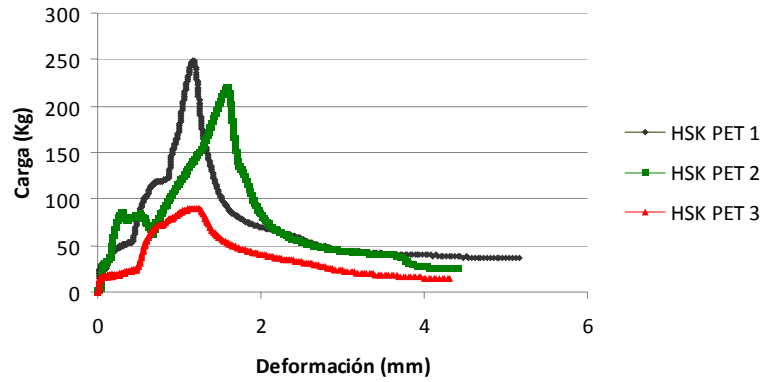


Figura VII.188 Adherencia por tracción para el Sistema 15

Sistema 16 - MAC PET

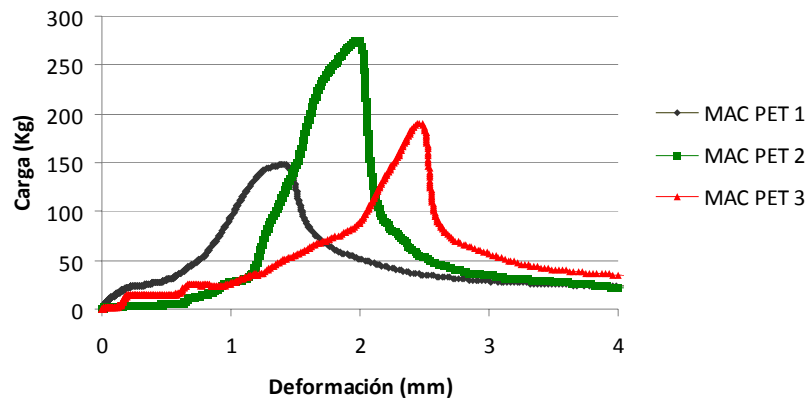


Figura VII.189 Adherencia por tracción para el Sistema 16

Sistema 17 - FM PP

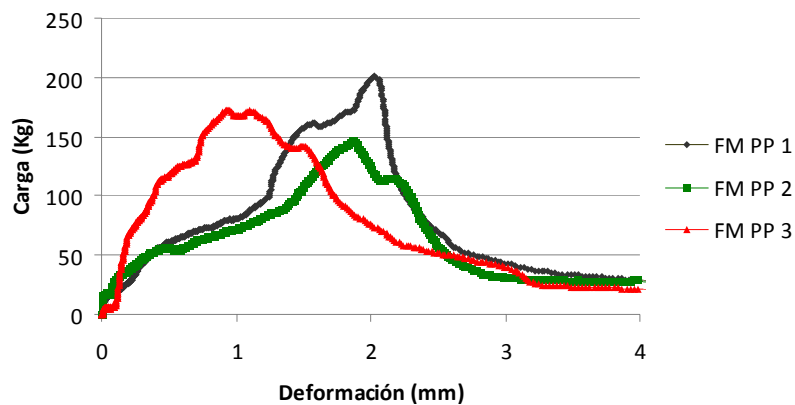


Figura VII.190 Adherencia por tracción para el Sistema 17



Sistema 19 - GNT PET 150 g

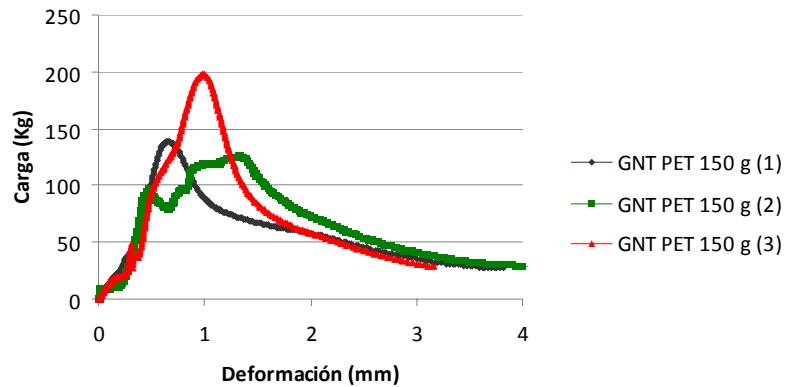


Figura VII.191 Adherencia por tracción para el Sistema 19

Tabla VII.30 Coeficiente de adherencia CAd para base asfáltica

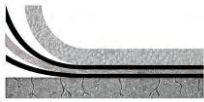
Material	Carga aplicada (Kg)	Tensión (MPa)	Tensión (Kg/cm ²)	CAd
Sistema 13 (Referencia)	433,81	0,516	5,261	1,00
Sistema 15 (HSK PET)	186,33	0,219	2,233	0,42
Sistema 16 (MAC PET)	204,97	0,240	2,460	0,46
Sistema 17 (FM PP)	173,20	0,203	2,069	0,39
Sistema 19 (GNT PET 150 g.)	154,20	0,181	1,845	0,35

VII.3.2.6 Análisis del ensayo a tracción directa

A través de la determinación de los parámetros de la mezcla asfáltica compactada sobre hormigón se comprueba que, de no existir la emulsión como agente de adhesión, no existe adherencia entre capas.

Los resultados a tracción directa presentan grandes variaciones en los resultados y en las propias curvas para un mismo material.

Al finalizar los ensayos el material geosintético con abertura de malla abierta queda adherido, en la mayoría de los casos, a la base asfáltica mientras que los materiales que cubren toda la superficie quedan adheridos a la base de hormigón.



Para el Sistema 3 compuesto por una capa de arena asfalto y el material HSK PET, el desprendimiento se produce en la interfase arena asfalto/mezcla asfáltica debido a que el material geotextil no tejido en polipropileno de base no funde con la temperatura de la mezcla asfáltica.

En casi todos los casos estudiados, la incorporación de un material geosintético, entre una capa de hormigón y asfáltica, mejora la adherencia en comparación con el contacto íntimo entre hormigón y mezcla.

Se evidencia en los coeficientes de adherencia obtenidos sobre una base de hormigón, que los sistemas contribuyen a la adherencia entre capas, a diferencia del Sistema 1. En este caso los materiales compuestos por una membrana asfáltica presentan buen comportamiento, siendo el material FM PP arena el que mejor resultado brinda al despegue de capas.

Para el caso de la interposición de los materiales geosintéticos entre capas asfálticas, se comprueba al igual que el ensayo por corte, los materiales reducen significativamente la adherencia entre capas.

Si se hiciera un análisis cualitativo de los resultados se puede decir, que la rotura de probetas que poseen materiales geosintéticos intercalados es del tipo dúctil, propiciando la deformación luego de la carga máxima hasta alcanzar la separación total de la probeta. Esta situación observada hace que los sistemas que consideran un material geosintético absorban mayor trabajo, determinado como el área bajo la curva carga vs. deformación.

En la Figura VII.192 podemos ver que los materiales geosintéticos en todos los casos ofrecen ventajas cuando se consideran entre una capa de hormigón y una capa asfáltica.

Las Figuras VII.193 y VII.194 indican la tensión de adherencia (MPa) que los diferentes sistemas ofrecen sobre una base de hormigón y una base asfáltica respectivamente.

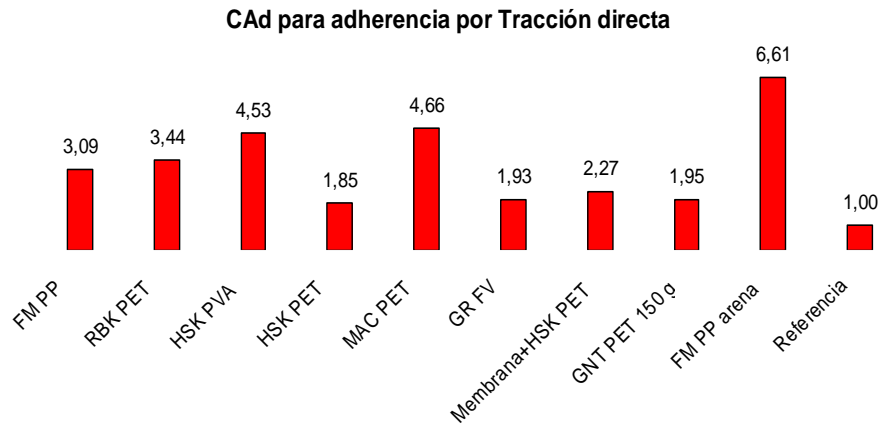
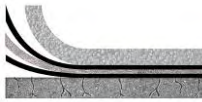


Figura VII.192 Coeficiente de adherencia (CAd) por tracción directa para los diferentes sistemas, base de hormigón

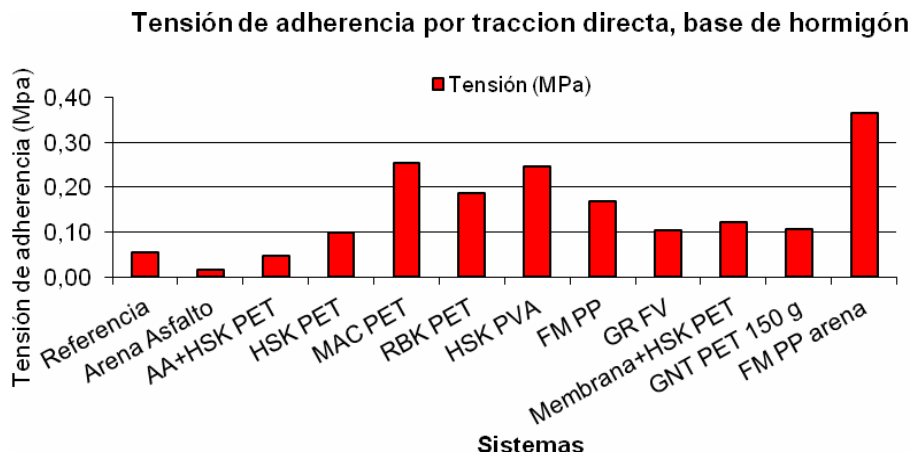


Figura VII.193 Adherencia por tracción directa, base de hormigón

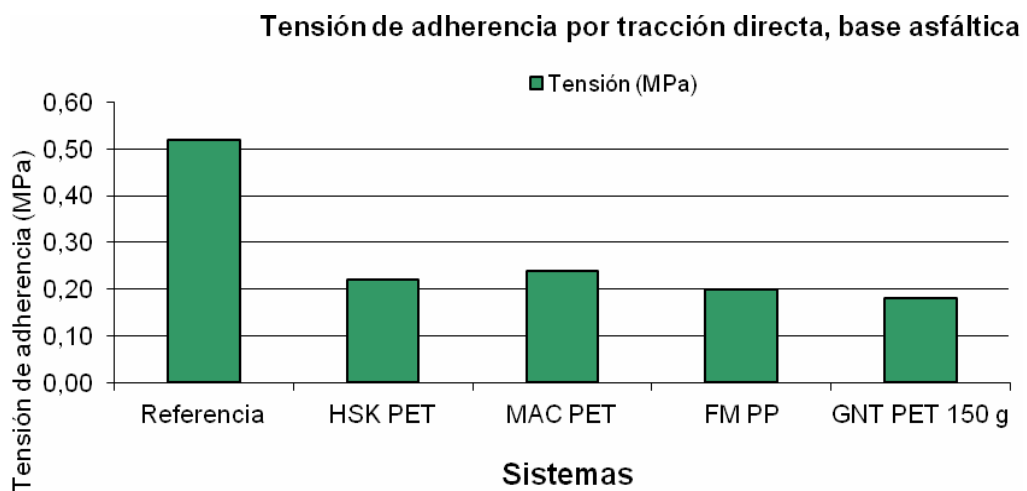
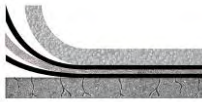


Figura VII.194 Adherencia por tracción directa, base asfáltica



VII.4 Análisis de adherencia entre capas

La Figura VII.195 indica la tensión de adherencia en MPa, a tracción directa y por corte, para los sistemas de referencia.

Podemos ver que la adherencia entre capas asfálticas es muy superior tanto a corte como tracción directa por la afinidad entre las mismas.

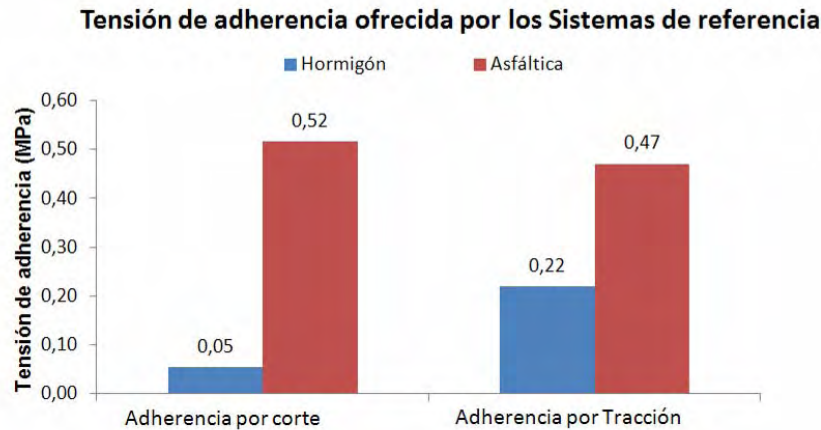


Figura VII.195 Ensayos de Adherencia para los sistemas de referencia

Los ensayos de adherencia, considerados sobre base de hormigón, muestran que aquellos materiales de malla cerrada (FM PP, RBK PET, FM PP arena y GNT PET 150 g.) presentan mayor adherencia a la sollicitación de tracción directa que a corte por flexión, Figura VII.196.

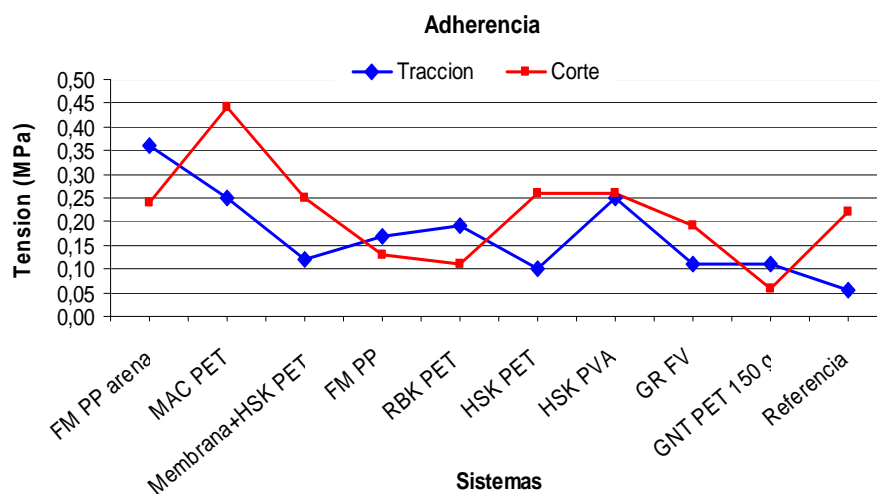


Figura VII.196 Adherencia por corte y tracción directa para los diferentes sistemas, base de hormigón



Hemos señalado la importancia de que el material geotextil tejido de base de ciertos materiales funda con la aplicación de la mezcla asfáltica.

La Figura VII.197 presenta la tensión de adherencia entre capas, considerando los ensayos de adherencia por corte y por tracción directa, observando la importancia para cuando el material funde y cuando no.

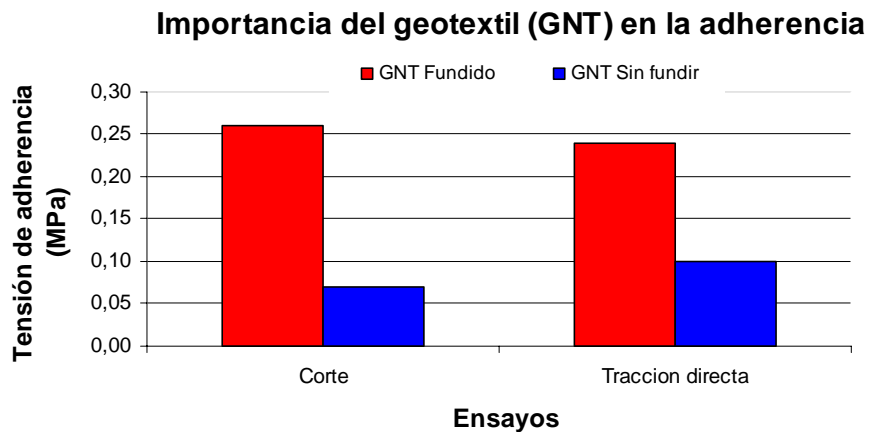


Figura VII.197 Adherencia sobre el material HSK PET, para el material de base GNT fundido y sin fundir

Teniendo presente que los movimientos relativos entre capas son un origen importante de fisuras y que cuando la adherencia entre ellas no es satisfactoria, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana; se confecciona la gráfica donde se relacionan los dos parámetros (adherencia y ciclos de carga) para los ensayos más representativos, adherencia por corte y carga cíclica por flexión, considerando los sistemas sobre una losa de hormigón con refuerzo asfáltico, Figura VII.198.

Es difícil establecer una relación entre los parámetros debido a que los materiales tienen diferente composición química y estructura, comportándose de forma diferente tanto en la adherencia como en la propagación de fisuras.

En la Figura VII.198, la adherencia es determinada como la carga máxima, en Kg, que se necesita para desprender las capas.

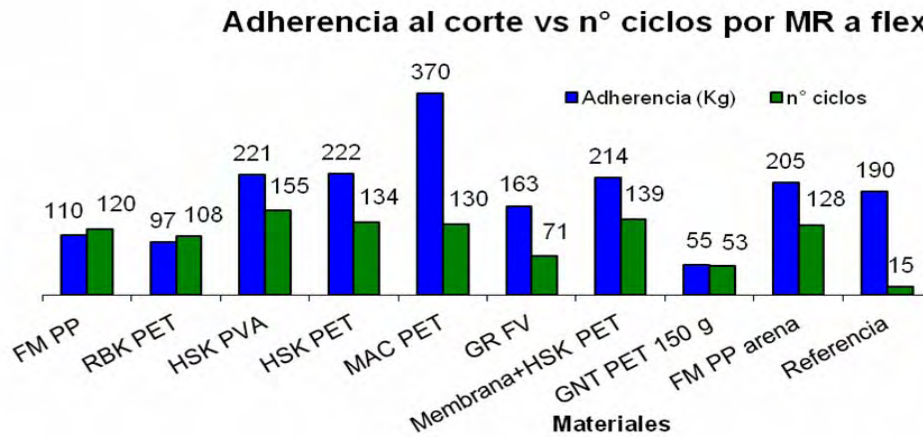
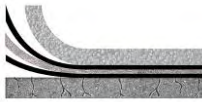


Figura VII.198 Comportamiento de los diferentes sistemas al reflejo de fisura y la adherencia entre capas

Realizando un análisis de la adherencia alcanzada por los sistemas, podemos decir que los materiales FM PP, RBK PET, GNT PET 150 g. y GR FV presentan valores por debajo del alcanzado por el Sistema de Referencia; como se mencionó anteriormente estos materiales cubren toda la superficie, no permitiendo el contacto íntimo entre capas. Si bien el material GR FV posee una abertura de malla de 20x20 mm, esta resulta escasa o para permitir una adecuada interacción entre las mismas.

El material FM PP arena ha incrementado casi un 50% su comportamiento, al incorporar al material una membrana viscoelástica con arena dispersa en su superficie, permitiendo un contacto más efectivo con la capa asfáltica superior, de la misma manera con el material Membrana+HSK PET se ha logrado un mejor rendimiento y beneficio.

En cuanto al reflejo de la fisura, claramente todos los sistemas brindan un retardo en su inicio y propagación, siendo la composición de las fibras y estructura, la responsable de una menor o mayor ventaja.

Concluimos que los materiales geosintéticos son efectivos como sistemas anti-reflejo de fisuras; que los mismos modifican la interfase del sistema compuesto, siendo necesario su estudio técnico y económico ya que no todos trabajan por igual ni brindan las mismas ventajas.



CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES



VII.1 CONSIDERACIONES GENERALES

A lo largo de la investigación se ha realizado la fundamentación teórica del trabajo con amplia experimentación en laboratorio sobre los materiales componentes de los diferentes sistemas considerados, llegando a la aplicación práctica en distintas obras viales de Argentina y Chile.

Se han realizado diferentes aportes a nivel académico, a través de publicaciones, presentaciones en congresos nacionales e internacionales, seminarios y talleres de capacitación, donde se presentaron los problemas, avances y soluciones alcanzadas, Anexo 1; también se interactuó con el sector privado mediante convenios y transferencia tecnológica en el diseño, desarrollo y caracterización de nuevos materiales, Anexo 2.

La presente tesis fue base para la aprobación del proyecto I+D “Sistema dinámico de valoración para el control de fisuración refleja usando geosintéticos como S.A.M.I. en la rehabilitación de pavimentos”, Aprobado por Consejo Académico UTN La Plata (Resolución N° 288/11) y por Consejo Superior Código 25/IO54. Aprobado Programa de Incentivos Código UT11617.

VII.2 OTRAS CONSIDERACIONES

Considerando el deterioro de un pavimento de hormigón y su inminente restauración, se buscaron las herramientas necesarias con el objeto de representar las condiciones reales de sollicitación y lograr, mediante la interposición de materiales con diferente composición química y conformación, combinaciones ideales para recuperar y fortalecer el deterioro producido.

Por ello se estima que los métodos adoptados, dentro de la amplia gama de ensayos, resultan apropiados para cubrir los objetivos de la tesis.



Se ha comprobado que la adherencia entre capas es un factor decisivo en el comportamiento estructural del pavimento, donde el desempeño de la unión entre capas depende de factores como el tipo de riego de liga; la tasa de aplicación de acuerdo al porcentaje de residuo de la emulsión; el tiempo de curado y las condiciones de textura y limpieza de la superficie.

La inclusión de un material geosintético altera los factores mencionados, por lo que a partir del estudio realizado se ha podido innovar y desarrollar, a nivel nacional, materiales capaces de ser introducidos entre una capa de hormigón y una capa asfáltica; la utilización de una emulsión asfáltica modificada con polímero SBS ha permitido valorar y revelar problemas que comúnmente se manifiestan en las obras viales de nuestro país, los cuales no tenían fundamentación teórica.

Los resultados obtenidos experimentalmente justifican el empleo de los materiales con el fin de prevenir la propagación de fisuras, encontrando que los mismos afectan principalmente la adherencia entre capas asfálticas. Cuando se los introduce en la interfase losa de hormigón/capa asfáltica, los geosintéticos presentan mayores ventajas en relación al sistema de referencia adoptado.

Considerando la bibliografía y la base de datos de las normativas más actualizadas, se concluye que no existe normativa ni consenso entre los distintos investigadores en cuál de todos los equipos disponibles en el mercado internacional es el más representativo ni el más conveniente. Los límites tolerables de una buena o mala adherencia o de un sistema efectivo como anti-reflejo de fisura se fundamentan en su comportamiento frente a las condiciones del sistema de referencia adoptado.

Por ello, es que resulta imprescindible llegar a un consenso en las dimensiones de las probetas; equipo y condiciones de carga y la temperatura con el propósito de unificar los distintos ensayos a nivel mundial y lograr trabajos de inter laboratorios que permitan adoptar



valores límites de aceptación y/o rechazo de los diferentes materiales que pueden ser considerados en la estructura de un pavimento.

En este sentido, las experiencias realizadas permiten desarrollar una síntesis del desempeño de diferentes materiales geosintéticos y los métodos que pueden ser tenidos en cuenta para una metodología de proyecto racional que permitan valorar diferentes alternativas según la problemática que la obra presente. Sin embargo, en tanto no existan pruebas a escala real de comparación, correctamente diseñadas y adecuadamente ejecutadas y seguidas en el tiempo, la eficiencia de las diferentes alternativas anti-reflejo seguirá siendo materia de discusión.

VII.3 SOBRE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

Las emulsiones asfálticas son materiales ampliamente utilizados en los pavimentos con el fin de ligar distintas capas; no se han encontrado investigaciones en cuanto al contacto de las mismas con los materiales geosintéticos.

La utilización de las emulsiones es imprescindible para brindar el vehículo de transferencia de carga entre los materiales; en caso de no realizar una aplicación de ésta, no existe adherencia más que la mecánica debida a la rugosidad de las superficies, lo cual ha sido comprobado en las experiencias de laboratorio.

La interfase es el medio que pone en carga el material geosintético; por ello, la resistencia mecánica de la interfase y de la fibras son parámetros importantes a considerar para caracterizar el comportamiento general del sistema compuesto.

Las imágenes SEM obtenidas en este sentido permitieron observar que el residuo de la emulsión, conformado por el polímero SBS, forma una red polimérica que vincula los materiales, favoreciendo la adherencia entre capas (Capítulo IV, IV.13, Figura IV.45).



La función de la emulsión es muy clara; conociéndose la superficie a restaurar se puede definir qué tipo y dotación aplicar. Sin embargo, esto por sí solo no asegura que los materiales depositados sobre la misma presenten una satisfactoria adherencia. Siendo la interfase una zona difícil de examinar, se conjetura que los enlaces de van der Waals y los químicos, además de una serie de variables como la tensión superficial, la limpieza de la superficie y el trabado mecánico, logren finalmente la adherencia esperada.

La emulsión asfáltica modificada seleccionada para la parte experimental presenta buen comportamiento; se concluyó a través del ensayo de ángulo de contacto que se genera un adecuado equilibrio entre la energía superficial del hormigón y la tensión superficial de la emulsión: la adecuada humectación y coalescencia generan una película uniforme sobre el hormigón preparada para recibir el material geosintético.

La existencia de solventes o agua remanente, debido a las condiciones ambientales o residuales del ligante, generan por colocación de la mezcla asfáltica en caliente una interfase gaseosa que conduce a valores de adherencia inferiores a lo requerido. Esto se ha comprobado a través del seguimiento de una de las obras en donde se aplicó un material geosintético en una zona urbana, Anexo 2.

De acuerdo a la experiencia obtenida tanto en laboratorio como en obra, se debe tener ciertos recaudos a la hora de aplicar un riego con emulsión a fin de optimizar el comportamiento de los sistemas anti-fisuras como ser: una dosificación adecuada de acuerdo al tipo de residuo y material geosintético adoptado; buena uniformidad en toda la superficie; tiempo de rotura y condición de la superficie correcta.

VII.4 SOBRE LOS MATERIALES GEOSINTÉTICOS

Estos materiales se importan desde 1930; con el inicio de la investigación y conjuntamente con empresas nacionales que invirtieron en equipos, se



avanzó en la línea de producción y control de calidad de ciertos tipos de materiales geosintéticos, en particular con geotextiles no tejidos en poliéster y geocompuestos con fibras en polipropileno.

Las fibras sintéticas consideradas en su producción son capaces de resistir la abrasión y los ataques químicos, ofreciendo buen comportamiento a las sollicitaciones a la cual se exponen, algunas en mayor medida que otras. Su elección se debe centrar en las características técnicas de las mismas, su facilidad de fabricación (etapas), eficiencia en servicio y costo.

VII.4.1 Comportamiento frente a la temperatura

Los materiales geosintéticos estudiados están constituidos por fibras sintéticas las cuales tienen diferentes respuestas frente a la temperatura y sollicitaciones. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre los materiales, sometidos a una mezcla asfáltica convencional a temperaturas de 140 °C y 160 °C, permitió validarlos frente a esta condición debido a que las resistencias alcanzadas, luego de exponerlos a las temperaturas de uso, no presentaron reducción significativa (Capítulo V, Punto V.5.2, Figuras V.20 y V.21).

El material RBK PET presenta un notable incremento en su deformación con la temperatura, hecho que se debe a la reorganización de las fibras en la dirección de la carga. Comportamiento semejante presenta el material GNT PET 150 g. embebido en emulsión asfáltica modificada con polímero SBS, el cual forma una estructura más enredada luego de ser impregnado, ofreciendo el material mayor capacidad de carga y menor deformación (Capítulo V, Tabla V.10). Para este material, a mayor temperatura de aplicación de la emulsión, el material absorbe mayor cantidad en su estructura, aumentando en un 92% su resistencia a la tracción, brindando adicionalmente una barrera impermeable más efectiva.



Estos tipos de materiales, que brindan grandes deformaciones a tracción y ofrecen ventajas en cuanto al sistema de referencia adoptado, no trabajan efectivamente en la prevención del reflejo de fisura ya que los pavimentos trabajan en bajas deformaciones.

Para los materiales que poseen un geotextil no tejido en polipropileno de base (HSK PET, HSK PVA y MAC PET), al entrar en contacto con la emulsión asfáltica, revelaron la modificación de una de las propiedades térmicas del material al indicar un punto de fusión del conjunto más alto que para el material virgen.

Este factor es muy importante ya que se han presentado casos particulares en obra donde la no degradación del polipropileno perjudica la adherencia entre capas, efecto que se ha comprobado en los ensayos experimentales.

Analizando esta problemática, donde se necesita mayor temperatura de la mezcla asfáltica para fundir el material, se han ejecutado ensayos sometiendo el material a 180 °C, con y sin impregnación de emulsión modificada (ECRR-M, Capítulo V, Tabla V.8), los que permiten concluir que el material luego de ser impregnado altera sus condiciones originales reduciendo su comportamiento a tracción en aproximadamente un 10%.

En todos los casos se debe tener precaución con la temperatura de colocación y compactación de la mezcla asfáltica, debido a que ciertos polímeros degradan sus propiedades modificando la arquitectura de la fibra, al sobrepasar los 160 °C.

En cuanto a la resistencia a tracción que los materiales ofrecen, estos presentan diferentes comportamiento debido a la composición química de la fibra utilizada en su producción; si bien la resistencia a tracción disminuye con la aplicación de la mezcla asfáltica en caliente, los niveles de reducción no resultan considerables, validándolos como sistema anti-reflejo de fisuras.



VII.4.2 Posición dentro de la estructura

De las experiencias realizadas, donde se ha variado la posición del material geosintético dentro de la estructura del pavimento, se ha observado que la posición para la cual el material ofrece su mayor performance es en la fibra inferior de la capa, debajo de la línea neutra, donde se prevé que se produzca la mayor tensión de tracción, Anexo 2.

El mecanismo de propagación es retro-alimentable, a medida que avanza la fisura, la zona resistente del pavimento disminuye siendo mayores las tensiones concentradas en la extremidad de la fisura, repitiéndose el proceso con mayor intensidad en cada ciclo de carga.

En el caso de tener que rehabilitar un pavimento, no se justifica la colocación de una capa mayor a los 2 cm de espesor, debido a que la fisura alcanza la posición del material interpuesto en un corto período de tiempo, para luego comenzar a actuar el efecto de costura que el material geosintético ofrece.

VII.4.3 Geometría de la fibra

Una fibra cilíndrica ofrece mayor carga y resistencia al deslizamiento, a diferencia de una fibra recta y lisa. La geometría cilíndrica agrupa mayor cantidad de filamentos para conformar una fibra, esto tiene incidencia en el espesor, conformación de la malla y el nivel de resistencia.

Ciertos materiales presentes en el mercado tienen abertura de malla que varían entre 20 mm y 50 mm. Estas aberturas se encuentran limitadas; no puede ser muy pequeña porque entra en juego el factor económico, ni muy grande por un problema de exceso de deformación entre nudos.

En este sentido se debe tener presente que, para mantener los mismos niveles de resistencia, hay que variar el diámetro versus la cantidad de los filamentos que conforman una fibra para lograr resistencias acordes por



metro de longitud, parámetro determinado en las especificaciones de estos materiales.

VII.4.4 Espesor del material

El espesor de los materiales introducidos entre capas no se traduce necesariamente en un aumento en el refuerzo estructural del pavimento. Si bien los materiales tienen diferente composición química y estructura, puede decirse que el espesor influye en los resultados se trate de un material de malla cerrada o de malla abierta.

Los ensayos de adherencia por corte reflejaron que los materiales de mayor espesor ofrecen un mejor comportamiento, lo que se traduce en un anclaje mecánico de las fibras sobre el sustrato (Capítulo VII, Figura VII.155). Esta consideración ayuda a disminuir las deformaciones verticales (ahuellamiento), de acuerdo a los resultados obtenidos con el dispositivo de rueda cargada (Capítulo VII, VII.2.1.4.1.1, Figura 29).

Para el caso de los materiales compuestos con una membrana asfáltica con espesores de 1,7 mm; material FM PP con fibras en polipropileno orientadas y el material RBK PET con fibras en poliéster dispuestas aleatoriamente, se puede decir que la disposición de las fibras alineadas ofrecen mayor performance de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y de cargas dinámicas, a pesar de ser el poliéster mas resistente que el polipropileno.

VII.5 SOBRE PROPAGACIÓN DE FISURAS EN PAVIMENTOS

El fenómeno de reflejo de fisuras es uno de los deterioros más comunes, pero resulta difícil determinar el mecanismo de propagación de una fisura debido a los diversos factores que entran en juego en su evolución: cargas del tránsito, condiciones climáticas, los materiales y esqueleto granular que forman el paquete estructural, la condición de deterioro que el pavimento manifiesta y la técnica constructiva llevada a cabo.



La utilización de asfaltos modificados así como la interposición de delgadas capas especiales contribuye a afrontar el problema. Ellos aumentan el recorrido de la fisura ayudando a aislar térmicamente la losa de hormigón y reducen con ello los diferenciales de temperatura entre el día y la noche; sin embargo, no garantizan su neutralización como se ha comprobado al interponer una capa de arena asfalto, donde la fisura se inicia y propaga rápidamente al superar la resistencia a tracción del material.

Se han considerado varias alternativas, donde el tipo de material marca la diferencia a la hora de la selección. Si bien la mayoría han demostrado alto rendimiento en el retardo de la propagación de una fisura a la superficie, no todas trabajan por igual ni brindan las mismas ventajas.

Se pudieron representar las condiciones de sollicitación sobre un pavimento mediante el equipo de rueda de carga (WTT) y el de cargas cíclicas (MR), siendo este último el que mejor permitió evidenciar el comportamiento de los diferentes sistemas en el inicio y progreso de una fisura y con el cual se han representado las condiciones de sollicitación en coincidencia con una junta o fisura; posición de flexión y corte.

VII.5.1 Ensayo de la rueda de carga (WTT)

A través de este ensayo pudimos comprobar que la interposición de materiales geosintéticos claramente aporta beneficios considerables en cuanto al retardo de la propagación de una fisura, con el consecuente aumento de la vida útil del mismo.

Cuando se utilizó el material RBK PET, compuesto de una membrana viscoelástica y fibras en poliéster distribuidas aleatoriamente, la propagación de la fisura fue vertical, mientras que en los casos donde se utilizó un material compuesto por fibras sintéticas orientadas (FM PP, FM PP arena y Membrana + HSK PET), el crecimiento de la fisura manifestó un redireccionamiento horizontal para luego propagar verticalmente.



Con los materiales FM PP arena y Membrana + HSK PET, los cuales surgieron en el desarrollo de la tesis, se obtuvo una ganancia del 20% en su comportamiento en cuanto a la prevención de la fisuración.

El material HSK PVA, el cual innovó con el tipo de fibra (polivinil alcohol), demostró buena eficiencia en el retardo de la fisuración refleja tanto en el ensayo a 25 °C como a 60 °C. Esto se ve justificado de acuerdo a los ensayos de tracción realizados, donde este material mantiene los niveles de resistencia y deformación con el incremento de la temperatura, con un módulo de rigidez (Jsec) elevado (Capítulo V, Figura V.57).

Si bien la grilla en fibra de vidrio (GR FV) es la que posee mayor módulo de rigidez, su comportamiento a la fatiga no resulta bueno, posiblemente debido a la pérdida de resistencia a tracción por la compactación de la mezcla asfáltica a 160 °C, y a la deficiente adherencia entre capas evidenciada.

En la mayoría de los sistemas con tratamiento anti-reflejo, la fisura experimentó un redireccionamiento en forma paralela a la fibra más traccionada: las figuras de ciclos versus apertura de fisura permitieron apreciar el trabajo efectivo del material geosintético a través del efecto de costura, el cual impide el avance de la fisura hacia la fibra superior comprimida (Capítulo VII, Figuras VII.39, VII.42 y VII.47).

La temperatura de ensayo ha sido un condicionante para el desarrollo y la visualización de la propagación de la fisura. A 25 °C la mezcla se comporta rígida favoreciendo la visualización del crecimiento de la fisura mientras que a 60 °C la deformación de la mezcla permite que la fisura se cierre por las deformaciones sufridas por el paso de la rueda de carga. Por lo tanto, la temperatura debe ser seleccionada de acuerdo a la región donde se apliquen los materiales con el fin de representar lo más real posible las condiciones de trabajo a la cual se verán sometidos.



En los ensayos realizados a 60 °C la capa asfáltica de refuerzo manifestó cierto desplazamiento lateral como consecuencia de las condiciones de borde: aplicación de la carga, la cara frontal sin confinamiento y temperatura de ensayo (Capítulo VII, Figura VII.27). Bajo estas condiciones se registraron las deformaciones plásticas de los sistemas; a través del software de registro continuo se pudo constatar que el ahuellamiento sufrido por el paso de la rueda de carga disminuye cuando se utiliza un material geosintético (Capítulo VII, Figura VII.29).

Los materiales FM PP, RBK PET, FM PP arena y la membrana adosada al HSK PET, han sido innovadores en su aplicación directa sobre la losa de hormigón logrando comportamientos aceptables en el retardo de la fisura. Estos materiales brindan adicionalmente una importante ventaja dado que se comportan como una barrera impermeable al ingreso del agua de lluvia.

Se concluye que para el ensayo rueda de carga (WTT) los materiales geosintéticos no eliminan el problema del reflejo de la fisura pero sí lo retardan considerablemente.

Así, para el ensayo de rueda de carga ejecutado a 25 °C, el material Membrana + HSK PET es el que mayor efectividad presentó, alcanzando un factor de efectividad FEF = 35,9 en relación al sistema de referencia adoptado, Figura VII.56.

VII.5.2 ensayo de carga cíclica (MR)

En los ensayos de carga cíclica, el inicio y la propagación de la fisura se evidencia rápidamente: el ascenso vertical de la fisura va acompañando las caras de los agregados que encuentra en su camino, pudiendo afirmar que el esqueleto granular es un factor importante en los resultados obtenidos por los diferentes sistemas.



Al interponer un material geosintético, el ascenso de la fisura se interrumpe temporalmente manifestando diferente comportamiento según el tipo de material, para luego seguir su camino en forma vertical hacia la superficie de la capa de refuerzo, uniéndose con micro fisuras generadas en la masa de la mezcla asfáltica como consecuencia de la fatiga de la misma.

En algunos casos el mecanismo de fisuración pasa de tener una única fisura a varias microfisuras de menor potencial de propagación.

Los resultados manifiestan un claro beneficio de los materiales geosintéticos cuando se introducen entre capas de un pavimento, siendo la posición de flexión la que representa mayor sollicitación al material; debe tenerse presente que la sollicitación debida al paso del tránsito produce dos movimientos de corte y una de flexión en los bordes de la fisura por cada ciclo de carga.

Para este ensayo y considerando el material sobre la base de hormigón, el material HSK PVA presentó un beneficio 12,9 veces superior en comparación con el sistema de referencia en la posición de flexión y 6,9 veces superior en la posición de corte, Capítulo VII, Tabla VII.12 y Tabla VII.15 respectivamente.

Comparando en qué sistema se comporta mejor un material geosintético, se ha comprobado mediante el ensayo a flexión que, los materiales de malla abierta, ofrecen su mayor rendimiento entre capas asfálticas; así por ejemplo, para el material HSK PET se obtiene un beneficio de 11,2 veces sobre una losa de hormigón mientras que el beneficio ofrecido sobre una base asfáltica es de 15,4 veces.

Sin embargo, los materiales de malla cerrada como RBK PET y FM PP ofrecen un mejor comportamiento cuando se los coloca sobre una base de hormigón. El material FM PP brinda un beneficio de 10 veces superior cuando se lo coloca entre una losa de hormigón y una capa asfáltica,



mientras que entre capas asfálticas el beneficio es de 8,8 veces. Capitulo VII, Tabla VII.12 y Tabla VII.17 respectivamente.

El comportamiento de los materiales a las cargas cíclicas claramente dependen de su resistencia a la tracción; a medida que la resistencia a tracción de los materiales se incrementa, la cantidad de ciclos necesarios para que la fisura alcance la superficie resulta mayor, lo que se ve traducido en un aumento de la vida útil del pavimento (Capítulo VII. Figura VII.71).

Se concluye que bajo este ensayo los materiales geosintéticos ampliamente retardan el ascenso de una fisura, siendo su comportamiento mucho mejor cuando se lo introduce entre capas asfálticas.

VII.6 SOBRE LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS

Los pavimentos de hormigón a ser rehabilitados mediante recapados asfálticos forman un sistema multicapa el cual debe trabajar monolíticamente para asegurar la vida útil del camino (Capítulo II, II.8).

Desde un principio se sospechó que la interposición de materiales geosintéticos pueden generar una discontinuidad importante disminuyendo o hasta anulando la adherencia entre capas o por el contrario, generar un anclaje debido a las interacciones químicas entre los polímeros que entran en juego en la interfase, y que pueden llegar a combinarse debido a la alta temperatura con que se coloca la mezcla asfáltica, logrando una unión mecánica a través de la rugosidad y/o una unión físico-química mediante la formación de una red polimérica entre los materiales intervinientes.

Los ensayos de adherencia, aplicados en la ingeniería vial, originalmente se implementaron para valorar la eficiencia de las emulsiones asfálticas como riego de liga. Los antecedentes relativos a estudios sobre la



adherencia interponiendo un material geosintético están limitados a los geotextiles no tejidos embebidos en asfalto, entre capas asfálticas.

La interposición de los mismos entre una base de hormigón y una capa asfáltica, motivo el estudio de la tesis y al interés de las empresas en valorar sus productos bajo las condiciones implementadas; durante el plan de tesis se desarrollaron nuevos materiales buscando afrontar la problemática.

Se ha encontrado en los ensayos efectuados, una metodología simple y de fácil aplicación en el control de la adherencia entre capas de un pavimento. Los mismos son aptos para ser utilizados en etapas de laboratorio sobre probetas, ya sea para investigación o control de calidad, como también en etapas pos obra sobre núcleos calados del pavimento. Su sencilla implementación lo hace apto para ser efectuado en laboratorios de obra.

Si bien se ha encontrado que la adherencia, por tracción directa, se ve incrementada en todos los casos, ciertos materiales geosintéticos al corte (los de malla abierta particularmente) ofrecen buena interacción entre la losa de hormigón y la mezcla asfáltica en relación al contacto íntimo hormigón/asfalto.

Cuando se los introduce entre capas asfálticas, todos los materiales generan una discontinuidad apreciable.

VII.6.1 Ensayo de adherencia por corte

Diferentes comportamientos manifiestan los materiales geosintéticos cuando se los interpone entre capas de un pavimento, según las curvas obtenidas. La adherencia alcanzada por los materiales ha variado considerablemente dependiendo sobre qué sustrato se los consideró. Esto se debe a la unión mecánica (rugosidad) entre la superficie de las capas y las fibras que conforman el geosintético.



Los materiales de malla cerrada diseñados en laboratorio y en el marco de la tesis (FM PP arena y Membrana + HSK PET) han mejorado la adherencia entre capas en un rango del 10 a 15%.

Es importante que el material geotextil agujado en polipropileno que poseen de base los materiales HSK PET, MAC PET y HSK PVA, funda a la temperatura de colocación de la mezcla, de lo contrario severamente será perjudicada la adherencia entre capas, Capítulo VII, Figura VII.197.

Se ha comprobado, considerando el material HSK PET (Sistema 4), que cuando el material funde se logra un incremento del 18% en la adherencia; cuando no funde se reduce en un 32%.

Analizando la adherencia alcanzada por el sistema con base fundida y sin fundir, la diferencia evidenciada entre ambos casos es de un 73%, Capítulo VII, Tabla VI.21.

Los materiales que cubren toda la superficie han reducido considerablemente la adherencia por corte en la interfase de los sistemas donde fueron colocados; así para el material FM PP la reducción ha sido de un 41%, mientras que para el material RBK PET ha sido del 50%. El material GNT PET 150 g. redujo la adherencia en un 73%, mientras que el material FM PP arena incrementó en un 10% la adherencia por corte. Este último material posee dos capas de mastic, favoreciendo el contacto con la capa base (hormigón) y la capa superior (asfáltica), brindando una efectiva barrera al agua.

Los resultados sobre probetas de mayor diámetro con base de hormigón, donde se consideró el material MAC PET, indican que conforme la abertura de malla se amplía, la tensión de adherencia se ve incrementada hasta un límite que corresponde a una abertura de malla de 40x40 mm donde luego la tensión de adherencia comienza a decrecer, Capítulo VII, Figura VII.151.

De la misma manera se puede decir que la adherencia se ve reducida a medida que la abertura de malla se incrementa, hasta acercarse a los



valores alcanzados por la probeta de referencia; sin embargo, la adherencia resulta mayor en todos los casos considerados con geosintético por el efecto de anclaje que el material brinda.

Se concluye de esta manera que la resistencia alcanzada al introducir un material geosintético de malla abierta entre una capa de hormigón y una capa asfáltica mejora la adherencia con respecto al contacto íntimo hormigón/capa asfáltica, siendo la abertura de 40x40 mm la óptima, Capítulo VII, figura VII.196.

VII.6.2 Ensayo de adherencia por tracción directa

La emulsión asfáltica es la única responsable de mantener ligados los materiales; los sistemas que consideran la interposición de un material geosintético brindan mayor ductilidad al desprendimiento de las capas al mantener ligadas las caras, absorbiendo mayor energía; ello fue observado por el trabajo necesario para desprender las mismas y calculado como el área bajo la curva carga/deformación.

De acuerdo a los resultados obtenidos de adherencia por tracción directa, la interposición de un material geosintético ayuda a mantener las capas adheridas en comparación con el sistema de referencia. Para el sistema donde se consideró una capa de arena asfalto, la adherencia se redujo un 68%.

Para los sistemas de malla abierta se ha logrado un incremento en la adherencia, en el mejor de los casos de 4,6 veces cuando se ha considerado el material MAC PET, mientras que para los de malla cerrada, cuando se ha considerado el material FM PP arena, el incremento es de 6,6 veces, Capítulo VII, Tabla VII.28.

Ahora bien, cuando los materiales se colocan entre capas asfálticas, la adherencia por tracción directa se ve reducida en un 60% en la mayoría de los casos, Capítulo VII, Tabla VII.30.



Si bien este ensayo no representa particularmente la sollicitación real a la que se encuentra sometida la interfase de un pavimento, se ha adoptado como medida de comparación para determinar la fuerza necesaria (resistencia de adherencia) para despegar las capas cuando se considera la interposición de diferentes materiales y evidenciar así el mecanismo que manifiestan en cuanto a la unión entre las mismas comparándolo con el sistema adoptado como referencia, Sistema 1.

VII.7 CONCLUSIONES FINALES

Atendiendo a lo planteado como objetivo principal de la tesis y objetivos específicos y complementarios, se menciona:

- Se han diseñado y estudiado los sistemas mediante métodos de ensayos implementados, reproducibles y verificados a nivel mundial, el comportamiento de la estructura de un pavimento al introducir materiales geosintéticos de diferente conformación y estructura química, con objeto de prevenir el retardo de la fisura refleja; nuevos materiales geosintéticos se diseñaron y desarrollaron en la presente tesis.
- Se ha plasmado la importancia de cuantificar la adherencia entre capas de un paquete estructural, las dificultades que conlleva en este sentido la aplicación de un geosintético entre las capas y su interacción con una emulsión asfáltica modificada con polímero del tipo SBS; no se encuentra para esto último bibliografía al respecto, siendo un importante avance.
- Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales permiten contribuir en el diseño de nuevos métodos de proyecto en la restauración de pavimentos tanto de hormigón como asfálticos.
- Se está trabajando en el Subcomité de Geosintéticos de I.R.A.M. (Instituto Argentino de Normalización y Certificación de Materiales), buscando establecer las herramientas para el proceso constructivo y control en obra, al interponer geosintéticos entre capas de un pavimento.



Queda entonces por responder los interrogantes planteados al comienzo de la investigación de la siguiente manera:

¿Qué fenómenos, en un pavimento rígido, pueden generar que una fisura se refleje sobre la capa que se coloca como refuerzo?

Son varios los fenómenos que generan primeramente la formación y luego la propagación de una fisura; la combinación de estos factores es compleja y se deben a las condiciones ambientales (variaciones climáticas y diferenciales térmicas entre capas), a la geometría de la estructura, a las propiedades de los materiales y a los niveles de carga.

Los pavimentos pueden manifestar diversas formas de fisuras, dependiendo de la combinación de los factores antes mencionados; estas fisuras son un indicador del tipo de daño que está ocurriendo y pueden ser de ayuda para comprender las causas del deterioro y por ende actuar de la manera más conveniente para dar una solución efectiva.

¿Qué consecuencias desfavorables tiene la reflexión de fisuras en la superficie de un pavimento asfáltico y porque interesa evitarla?

Son conocidas las consecuencias del reflejo de fisuras; éstas crean caminos de acceso del agua a las capas subyacentes acelerando el deterioro de los pavimentos. Se ha observado, en los ensayos de carga cíclica (MR) que la fisura recorre el camino de la interfase asfalto-agregado; centrada la propagación de la fisura en la película del ligante que recubre y une las partículas, se abrirá perjudicando el desempeño estructural y funcional debido a la degradación del revestimiento.

Es necesario evitar este tipo de fallas para mantener la vida útil del pavimento una vez que fueron restauradas las condiciones estructurales, de seguridad y confort para el usuario. De lo contrario se está generando una solución de corto plazo donde los mecanismos que producen la abertura de una fisura siguen actuando.



¿Cómo se comporta el paquete estructural al interponer, entre las capas, grillas poliméricas?

El paquete estructural encuentra en el material geosintético un aliado al absorber parte de la energía de propagación de una fisura como se ha demostrado en los ensayos dinámicos implementados. Un material geosintético, interpuesto entre capas, sea de hormigón y/o asfáltica, toma los esfuerzos efectivamente, siempre que exista buena adherencia entre los materiales.

Debe quedar en claro que la resistencia a la propagación de una fisura envuelve todos los componentes: desde la capa de refuerzo, capa intermedia, estructura del pavimento antiguo hasta la base de apoyo. Cada uno de estos debe ser tratado en la búsqueda del sistema global.

Buscando cubrir la problemática actual de nuestros pavimentos, se diseñaron los materiales FM PP arena y Membrana+HSK PET buscando brindar adherencia entre capas, efectividad en el retardo de una fisura y ofrecer una barrera impermeable al agua. Esto ha sido de significativa importancia para el desarrollo tecnológico de nuestro país.

¿Entre qué capas se comporta mejor el material geosintético en cuanto al retardo de la fisuración refleja, y en cuanto a la adherencia?

Del análisis de la interfase realizado mediante SEM, EDAX y observaciones con lupa (Capítulo VII, VII.1.2), podemos concluir que los diferentes materiales geosintéticos tienen buenos comportamientos cuando se los introduce entre capas de diferentes características; estos evidencian mayores ventajas entre capas asfálticas al indicar mayor porcentaje en masa de C y O, elementos que tienen alta electronegatividad, mayor capacidad de atraer electrones hacia sí, ofreciendo mayor fuerza de enlace.



En cuanto al reflejo de fisuras, los materiales geosintéticos se comportan mejor entre capas asfálticas por ser materiales afines a éstas, pero ello depende de la estructura del material geosintético (espesor, abertura de malla).

En cuanto a la adherencia ciertos materiales geosintéticos presentan mayor ventaja cuando se desea ligar una capa de hormigón con una capa asfáltica como se ha demostrado al compararlas con el sistema de referencia, mientras que en caso de introducir los materiales entre capas asfálticas, la adherencia se ha visto considerablemente reducida.

Los materiales pueden ser utilizados tanto en pavimentos flexibles como rígidos. El tipo de estructura no es un limitante en la utilización de estos materiales como refuerzo, más se trata de un condicionante en la decisión del tipo de material a utilizar, su correcto posicionamiento, ventajas y desventajas sobre el tipo de pavimento a rehabilitar y la emulsión utilizada como agente de adhesión.

¿Influye la temperatura de colocación de la mezcla asfáltica en caliente sobre los materiales geosintéticos?

La temperatura de colocación y compactación de una mezcla convencional tipo CAC D20 a 160 °C, como la utilizada en las experiencias, no perjudica mayormente las propiedades resistentes de los materiales geosintéticos utilizados.

Es necesario determinar el punto de ablandamiento del polímero constituyente de las fibras, para establecer el rango en que el polímero pierde sus condiciones resistentes. El punto de fusión debe ser lo suficientemente elevado para evitar que la temperatura de aplicación de la mezcla asfáltica ocasione deterioros irreversibles. Esto es crucial cuando se utilizan asfaltos modificados donde la temperatura de compactación es superior a la de los asfaltos convencionales.



Los materiales a base de polipropileno presentan adecuado equilibrio entre resistencia mecánica y flexibilidad. Estos presentan problemas durante la colocación de la mezcla asfáltica con temperaturas superiores a los 160 °C; esto se ve en los ensayos realizados a diferente temperatura a los que fueron sometidos los materiales. Si bien puede modificarse algunas de las propiedades mediante el aumento de su peso molecular, por ejemplo, esto trae aparejado un mayor costo de producción acercándose a otros tipos de solución con fibras de mayor capacidad.

En las primeras experiencias realizadas de adherencia por corte se comprobó, cuando se utilizó el material HSK PET particularmente, que el material base en polipropileno no fundía con la temperatura de colocación y compactación de la mezcla asfáltica (160 °C). Por ello se realizó el ensayo de punto de fusión sobre el material virgen y luego de estar en contacto con la emulsión asfáltica modificada con SBS, indicando que se necesita una temperatura mayor de la mezcla asfáltica para lograr fundir el geotextil no tejido. Esta es una importante consideración a tener en cuenta en la selección de materiales y temperatura de la mezcla.

¿Es realmente necesaria una capa de nivelación previa a la colocación de un material geosintético?

Algunos fabricantes consideran que no deben colocarse los materiales geosintéticos directamente sobre un pavimento de hormigón sin realizar una capa asfáltica previa de nivelación. Su fundamentación se basa en que los mismos trabajan mejor entre capas asfálticas por ser materiales poliméricos; esto lo hemos comprobado experimentalmente a través de los ensayos de adherencia, sin embargo, con el desarrollo realizado de nuevos materiales podemos omitir la colocación de una capa asfáltica previa de nivelación.

Considerando el ensayo de rueda de carga realizado a 25 °C y el Sistema 1 de referencia, la capa de nivelación (capa de arena asfalto, Sistema 2)



por si sola presenta un beneficio de 1,3 veces debido al mayor espesor que esta genera sobre el sistema global.

El sistema 3, que considera el material HSK PET sobre una capa previa, presenta un rendimiento de 12,3 veces superior, mientras que si el mismo material se coloca directamente sobre el hormigón (Sistema 4), el beneficio es de 29,6 veces, Capítulo VII, Tabla VII.9.

En este sentido se ha desarrollado el material FM PP arena, llegando a obtener a través del ensayo de rueda cargada realizado a 25 °C, un beneficio de 3,9 veces superior en comparación con la capa de arena asfalto, mientras que para el ensayo de carga cíclica el beneficio es de 5,6 a flexión y de 2,5 por corte. En cuanto a la tensión de adherencia por corte, esta resulta ser 1,9 veces mayor cuando se considera el material FM PP arena y 22 veces superior por adherencia a tracción directa, en comparación con una capa de nivelación previa.

Se concluye que los materiales geosintéticos pueden ser colocados directamente sobre el pavimento de hormigón, siempre que este provea una superficie uniforme, sin movimiento entre losas; de lo contrario una capa de nivelación resulta necesaria.

Un estudio técnico económico sería conveniente realizar para decidir qué alternativa conviene implementar según las condiciones existentes del pavimento a ser rehabilitado.

¿La incorporación de un material geosintético en el paquete estructural de un pavimento influye en la adherencia entre capas?

Como era de preverse, pero ahora con evidencia cuantificable, se puede asegurar que la incorporación de un material geosintético entre capas de un pavimento influye en la adherencia entre dichas capas, de diferente manera de acuerdo al ensayo y material considerado.



Por corte los resultados muestran que entre una capa de hormigón y una capa asfáltica la tensión de adherencia en la interfase de los sistemas se ve mejorada para algunos de ellos: los materiales de malla abierta han ofrecido los mejores resultados, mientras que entre capas asfálticas la adherencia disminuye considerablemente, siempre comparándose con el sistema de referencia respectivo.

En cambio por tracción directa, considerando una base de hormigón y una capa asfáltica, los resultados indican una mejora en todos los casos donde se consideró la interposición de un material geosintético. Esto se reflejó en un comportamiento dúctil en la rotura de las probetas, mientras que entre capas asfálticas la adherencia se ve reducida.

Dependiendo del tipo de pavimento a rehabilitar, la influencia de la adherencia se ve favorecida o perjudicada. Si lo que se busca es obtener el trabajo monolítico de la estructura, es imprescindible realizar las tareas necesarias para obtener el mejor beneficio sea cual fuere el sistema adoptado. La incorporación de los materiales geosintéticos se realiza con los fines de prevenir la fisuración refleja, siendo la adherencia un fenómeno no considerado debidamente en la bibliografía especializada.

¿Existe la posibilidad de optimizar la adherencia de un paquete estructural cuando se incorpora un geosintético?

Si, la manera de lograrlo requiere una caracterización completa de los materiales y una valoración de la adherencia previa en laboratorio. El análisis de sensibilidad, variando condiciones de la interfase tales como dotaciones de riego de liga, tipología de emulsiones a emplear, y tratamientos de las superficies a ligar, darán como resultados las condiciones óptimas de aplicación del material con las cuales se obtiene el mayor beneficio. Se requieren también tareas de auscultación previas del pavimento y la correcta aplicación del material anti-reflejo considerado.



Es difícil definir límites de una buena o mala adherencia. Ello dependerá del sistema adoptado y podrá establecerse su aceptación y/o rechazo realizando los ensayos y verificando los resultados logrados con el sistema de referencia que se establezca en cada proyecto.

¿Qué reacciones se producen en la interfase del sistema al utilizar emulsiones asfálticas modificadas?

La coalescencia de la emulsión (evaporación del agua) genera una red polimérica que vincula los materiales, como hemos apreciado en las imágenes SEM. Esta etapa debe finalizar antes de colocar un material geosintético, de lo contrario se genera una interfase gaseosa que reduce o elimina directamente la adherencia entre los materiales.

Cuando la emulsión entra en contacto con un material geosintético, particularmente con el material HSK PET, modifica algunas propiedades del mismo. Por un lado disminuye levemente la resistencia a tracción, aumentando la deformación, no siendo un problema significativo en su comportamiento como sistema anti-reflejo de fisura; por otro lado genera un incremento en el punto de fusión del material geotextil no tejido en polipropileno que tiene de base, para cuyo caso se induce que se genera una polimerización (reordenamiento de los polímeros intervinientes en la emulsión y el material geosintético) modificando las propiedades iniciales del material, afectando la adherencia entre capas.

En el caso de considerar el material GNT PET 150 g., la emulsión asfáltica genera sobre el material una reorganización estructural de las fibras dispuestas aleatoriamente. Esto genera un incremento en la resistencia alcanzada por el material reduciendo la deformación, favoreciendo el comportamiento de estos materiales en el sistema. En este sentido, cuando la emulsión es aplicada a una temperatura de 60 °C, se logra un mayor rendimiento del material ante el reflejo de fisuras. Para este material es indispensable realizar una valoración previa en cuanto al tipo y cantidad de ligante para obtener el mayor beneficio.



VII.8 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Con respecto a futuras investigaciones, se debe señalar que para la aplicación normalizada de los materiales geosintéticos, como refuerzo de las capas de un pavimento, en nuestro país queda aún mucho camino por recorrer.

Habría que trasponer a nuestra realidad nacional el conocimiento internacional, contrastar con ensayos y experiencias de ejecución documentadas su validez y alcance en nuestras redes de caminos.

Un tema pendiente es incorporar la tecnología de esta aplicación en la práctica habitual de la construcción con el fundamento científico-técnico; para ello se debe difundir intensamente el estado del arte actual de la aplicación de geosintéticos para el refuerzo de las capas de pavimentos.

La divulgación de esta tecnología poco difundida, ha generado importantes expectativas, ha brindado nuevos desarrollos y soluciones a problemáticas en distintas áreas de la ingeniería vial, viendo su justificación en los convenios con empresas interesadas en valorar sus productos y empresas con las cuales se ha realizado transferencia tecnológica en el desarrollo de nuevos materiales y adquisición de equipos de producción, capaces de afrontar la problemática.

Actualmente se encuentran algunos trabajos en marcha, los cuales consideran la fisuración refleja debida a las cargas térmicas, para lo cual se ha desarrollado el equipo de apertura y cierre de fisura, comenzando a realizar las primeras pruebas de calibración del dispositivo.

Se esta intentando introducir los neumáticos fuera de uso, como sistemas anti-reflejo, luego de obtener buenos resultados en los ensayos a tracción realizados sobre viejos neumáticos, brindando buenas expectativas con objeto de contribuir con el medio ambiente, siendo la forma de aplicación un problema pendiente.



Otros temas, no menores, a considerar deberían ser:

- Formular emulsiones asfálticas a escala de laboratorio teniendo en cuenta las propiedades de los materiales geosintéticos.
- Desarrollar nuevos recubrimientos sobre las fibras componentes de los materiales geosintéticos con el fin de lograr mayor afinidad con las emulsiones.
- Realizar tramos experimentales con las distintas tecnologías y materiales, monitoreando los tramos para complementar el análisis y comprobar el comportamiento de los materiales con tránsito real.
- Indagar a las distintas reparticiones viales de nuestro país con objeto de generar una base de datos de los tramos donde se utilicen materiales geosintéticos, para mantener una auscultación acorde de los mismos.

ANEXO 1. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES

Iniciada la investigación sobre el reflejo de fisuras en pavimentos y luego de participar en el primer Seminario de Geosintéticos realizado en Argentina, donde se brindó la aplicación de estos materiales en la obra civil, empresas constructoras acercaron sus inquietudes y consultas sobre el tema. Así se logró participar en varias obras donde se aplicaron materiales geosintéticos. A través del Centro de Investigaciones Viales (LEMaC) se diseñó y valoró el comportamiento en el tiempo, mediante la extracción de testigos, con el objeto de determinar la adherencia entre capas y el reflejo de fisuras.

Seguidamente se presentan algunas obras donde se participó en cuanto a la problemática de los pavimentos deteriorados. Se hace una descripción de la obra, el proceso constructivo y los resultados obtenidos de los ensayos sin elaborar un análisis de los mismos.

A.1 REHABILITACIÓN AVENIDA LEOPOLDO LUGONES (BS. AS.)

En enero de 2010 esta importante arteria de acceso a la ciudad fue asfaltada completamente por AUSA, ya que desde su creación, en la década del 70, poseía un pavimento rígido de hormigón.

A.1.1 Descripción de la obra

La obra abarca la Av. Leopoldo Lugones desde la bajada de la Av. General Paz hasta conectarse con la Av. Sarmiento (6,2 Km). La Av. Lugones fue repavimentada con mezcla asfáltica SMA 19.

A.1.2 Proceso constructivo

1. Las losas de hormigón fueron reparadas mediante actividades de bacheo, reconstrucción de losas y tomado de juntas y fisuras.

2. Las juntas transversales de los carriles destinados al tránsito pesado son las únicas que recibieron el tratamiento de colocación del material geosintético.
3. Las juntas se limpiaron con disco con el fin de retirar todos los restos de sellador y profundizar las mismas.
4. Se realizó sobre la superficie de las losas un microtexturado, con fresadora.
5. Una vez limpia la junta, se procedió a colar un sellador SA-40.
6. Con estas tareas desarrolladas, se procedió a realizar un riego de imprimación.
7. Se colocó el material geosintético, el cual se adhiere en frío al riego, por ende al hormigón. Debido a las irregularidades del microtexturado se paso un rodillo para fijarlo a la superficie.
8. Finalmente se colocó la capa de SMA 19.



Figura A.1 Proceso constructivo en la Av. Lugones (Bs. As.)

El trabajo consistió en evaluar la eficiencia del material como sistema anti-reflejo de fisura. Para ello se elaboró una propuesta de trabajo que consistió en caracterizar el material, bajo la normativa en vigencia en nuestro país. Sobre el material que consiste en una base asfáltica con un geotextil tejido en polipropileno desarrollado en nuestro país, se realizaron los siguientes ensayos:

- IRAM 78002 - Determinación de la masa por unidad de área
- IRAM 78004 - Determinación del espesor a presiones prefijadas
- IRAM 78011 - Ensayo de penetración estática (pistón CBR)
- IRAM 78012 - Ensayo de tracción con probetas anchas

Se propuso el desarrollo de la metodología de ensayo, mediante el equipo de Wheel Tracking Test, simulando las condiciones de obra a las cuales se encuentra sometido el sistema multicapa o paquete estructural.

Se propuso el ensayo de adherencia por corte (LCB) y establecer una correlación entre los valores obtenidos de las probetas de laboratorio y los testigos calados en la Avenida.

A.1.3 Resultados

En función de la política de Calidad de la empresa y del Nivel II de Reconocimiento del cumplimiento de los puntos correspondientes de la Norma ISO 17025 en el Laboratorio de Asfaltos y en el Laboratorio de Geosintéticos, se convino con la empresa que los datos de los ensayos realizados serán confidenciales y que los mismos no serán revelados a terceros. Por este motivo es que no se presentan los análisis realizados sobre este material.

Se puede decir que después de 3 años de ejecutada la obra, aún no han aparecido fisuras sobre la capa asfáltica debidas al reflejo de fisuras y que la adherencia alcanzada por el material geosintético entre capas ha sido aceptable.

A.2 ENSANCHE DE LA AVENIDA 60 ENTRE CALLE 7 Y 12 DE LA CIUDAD DE LA PLATA

En el marco del plan de pavimentación de la Municipalidad de La Plata, se intervino en el ensanche de una avenida urbana en el cual se utilizó un material geocompuesto para impedir el reflejo de una junta del pavimento

antiguo al pavimento nuevo. Se realizaron valoraciones previas en laboratorio y análisis posteriores sobre núcleos calados del pavimento. La obra ha sido ejecutada durante los primeros meses del año 2012.

Para esta obra se implementó el material FM PP con doble capa de Geotextil No Tejido en Polipropileno, cuyos resultados a tracción se presentan en la Figura A.2 y Figura A.3.

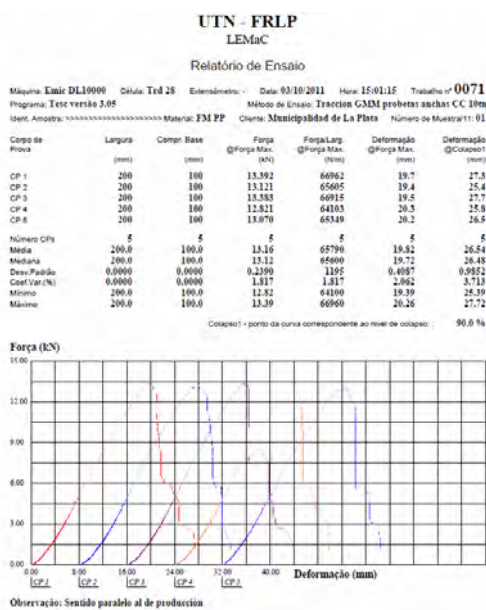


Figura A.2 Tracción en dirección paralela

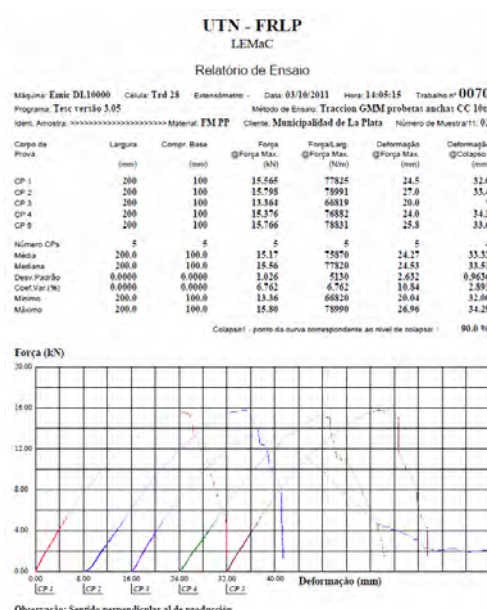


Figura A.3 Tracción en dirección perpendicular

A.2.1 Descripción de la obra

La obra consiste en la ampliación de la Av. 60 desde la Av. 7 (Plaza Rocha) hasta la Av. 13 (Plaza Máximo Paz) en un ancho de 2 metros, quedando dos calzadas de 8 metros entre cordones separadas por un cantero central de 4 metros.

El paquete estructural de pavimento existente está constituido por un antiguo pavimento adoquinado sobre el cual existe una carpeta de rodamiento de mezcla asfáltica. Para equiparar paquetes estructurales el proyecto del ensanche contempló la ejecución de una base de hormigón, en comparación con el pavimento adoquinado, sobre la cual se ejecutó

una carpeta de rodamiento de mezcla asfáltica de 5 cm de espesor para homogeneizar superficies de calzada con el pavimento existente.

A.2.2 Proceso constructivo

Se detectó que para salvar la junta de unión entre el pavimento de adoquines de base y la base de ensanche de hormigón, sería necesario interponer un material capaz de absorber posibles movimientos diferenciales de esa junta constructiva. La solución adoptada a tal efecto ha sido fresar 50 cm de ancho de la mezcla asfáltica existente sobre los adoquines, y colocar un material geosintético en un ancho de 100 cm, 50 cm a cada lado de la junta constructiva, capaz de retardar el reflejo de la junta constructiva en la nueva carpeta asfáltica de rodamiento. Previo a la aplicación del material geosintético se aplicó un riego de imprimación a una tasa de $0,9 \text{ l/m}^2$, se aplicó el geocompuesto y se administró un riego de liga a razón de $0,50 \text{ l/m}^2$; para finalizar se ejecutó la carpeta de rodamiento de mezcla asfáltica en caliente.

La Figura A.4 muestra un corte del sector del ensanche.

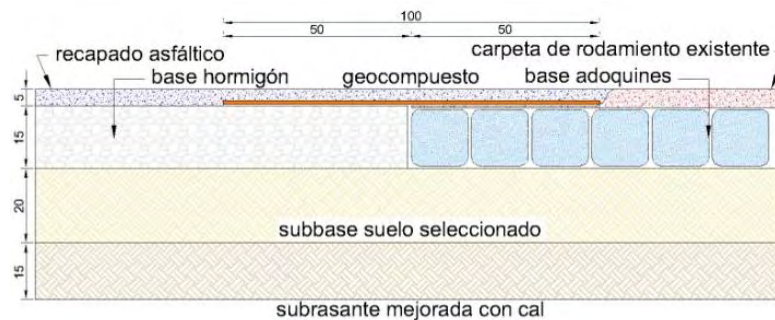


Figura A.4 Paquete estructural ejecutado en el ensanche

Se controló el sistema constructivo realizando los ensayos de las etapas y correcciones sobre el mismo, luego de 3 meses se sacaron testigos con objeto de valorar la adherencia entre capas.



Figura A.5 Proceso constructivo

A.2.3 Resultados

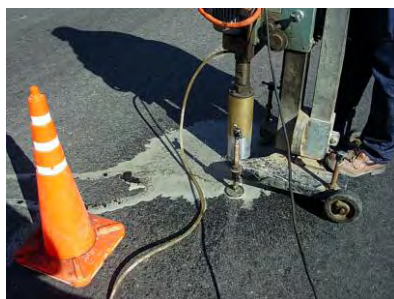


Figura A.6 Extracción de testigos



Figura A.7 Testigos ensayados

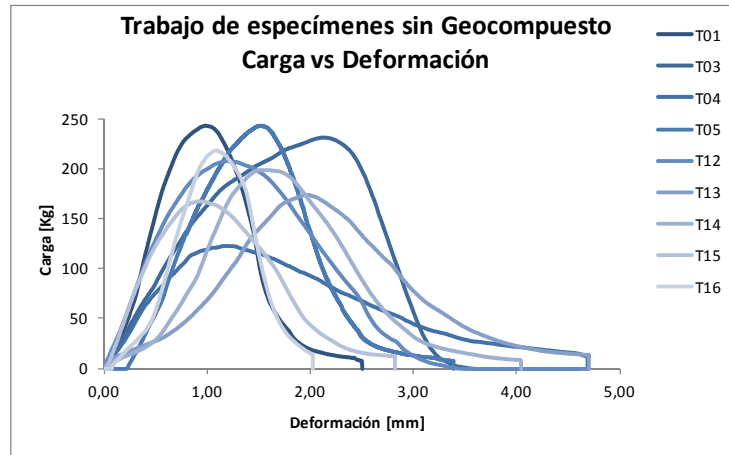


Figura A.8 Carga vs. deformación testigos sin material geosintético

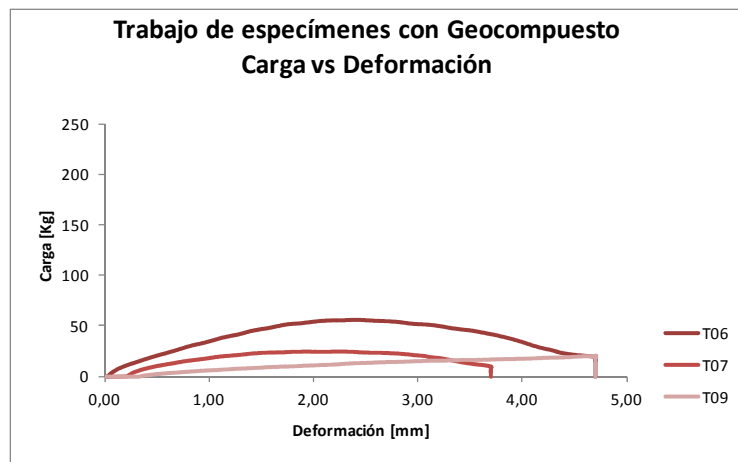


Figura A.9 Carga vs. deformación testigos con material geosintético

Los testigos calados fueron remitidos al Laboratorio donde se le efectuaron determinaciones de adherencia LCB, y a posterior a sus partes componentes (mezcla asfáltica y hormigón) se les determinó espesores y densidades aparentes para los testigos de mezcla asfáltica, y espesores y resistencia a compresión simple para los testigos de hormigón.

La baja adherencia ofrecida al introducir el material, se ha debido a las condiciones en las cuales fue aplicado (lluvia y con arrugas). Esto ha sido un factor determinante en el ensayo, Tabla A.1.



Figura A.10 Material defectuosamente colocado

Tabla A.1 Resultados de adherencia LCB en promedio

Testigo	sin material Geosintético	con material Geosintético
Tensión de adherencia (MPa)	2,3	0,4
Deslizamiento entre capas (mm)	1,4	3,2

También se realizó el ensayo de fatiga por flexión mediante carga cíclica mediante el equipo implementado (Módulo de Rigidez).

Los resultados obtenidos del paquete estructural se presentan en la Tabla A.2.

Tabla A.2 Flexión por cargas repetidas

Probeta	Temp. de ensayo (°C)	Ciclos de aparición de la fisura (n°)	Ciclos de propagación de la fisura (n°)
Sin geosintético	25	9	12
Con geosintético	25	32	120

Esto denota que el material geocompuesto tiene un valor cuantificable de aporte al retardo de la fisuración refleja, con lo cual se justifica su aplicación en una obra de las características de la analizada.

Pasados dos años de ejecución de obra la fisura longitudinal donde se aplico el material geosintético no se reflejo, pero sí se manifestaron las fisuras reflejas debidas a las juntas realizadas sobre el hormigón, donde no se contemplo la colocación del material.

A.3 REHABILITACIÓN AUTOPISTA VESPUCIO NORTE (CHILE)

El trabajo realizado, en esta obra en particular, tuvo como objetivo verificar la eficiencia de dos sistemas de rehabilitación de pavimentos en la Autopista Vespucio Norte (Chile), mediante la réplica en laboratorio de dos soluciones propuestas y ejecutadas en tramos experimentales. Las dos soluciones evaluadas han sido propuestas por el comitente del trabajo, según obra realizada en AU Vespucio Norte / Salida N° 17 Carril 6, Santiago de Chile.

A3.1 Descripción de la obra

La Autopista Vespucio Norte conecta el sector de El Salto (comuna de Huechuraba) con la Ruta CH-78, a través de la Avenida Américo Vespucio. Contempla una longitud de 29 kilómetros de doble calzada. Fue inaugurada el 4 de enero de 2006.

El análisis comparativo tuvo en cuenta los siguientes dos sistemas de rehabilitación de pavimentos rígidos:

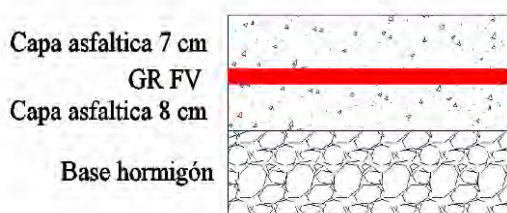


Figura A.11 Sistema 1

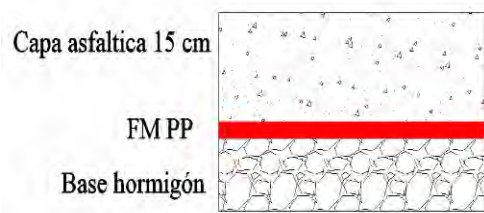


Figura A.12 Sistema 2

A3.2 Confección de probetas

La Figura A2.13 muestra la secuencia de moldeo.

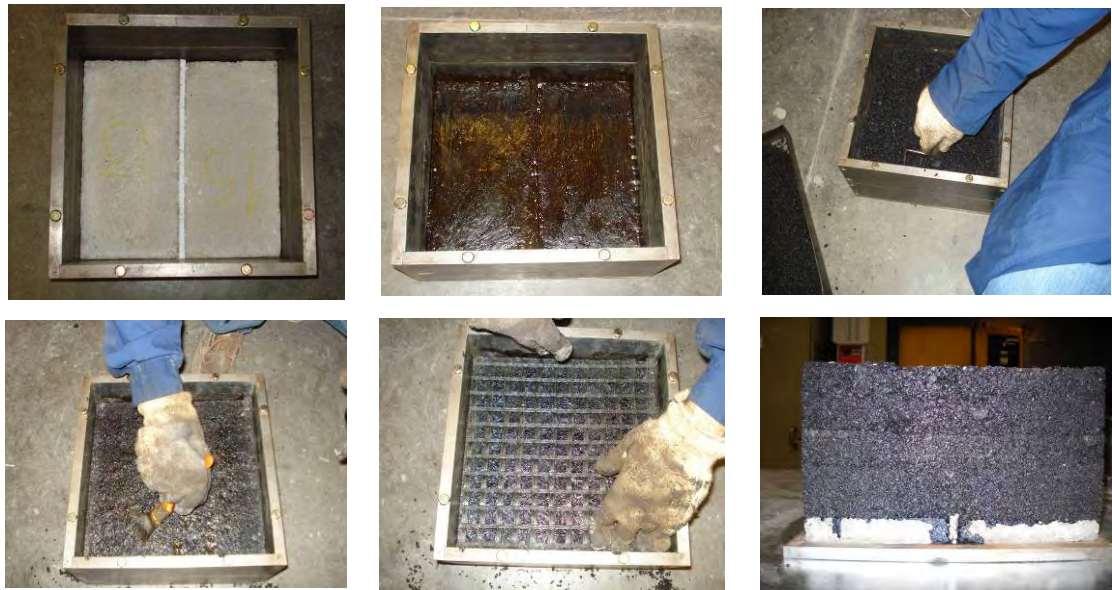


Figura A.13 Confección de probetas

A3.3 Resultados obtenidos

Tabla A.3 Paquete estructural evaluado – Sistema 1

Capa	Material	Características	Observaciones
Base pre-fisurada	hormigón	Espesor = 20 mm	-
Interfase 1	riego imprimación	Dotación = 0,90 l/m ²	ECRR-M
Capa 1	mezcla asfáltica	Espesor = 80 mm	-
Interfase 2	riego liga	Dotación = 0,50 l/m ²	ECRR-M
Interfase 3	Geogrilla	Espesor = 1,10 mm	GR FV
Carpeta de rodamiento	mezcla asfáltica	Espesor = 70 mm	-

Tabla A.4 Resultados a flexión por carga repetida – Sistema 1

Probeta n°	1	2	3	
Período de climatización	11:00	14:00	17:00	Promedio
	13:00	16:00	19:00	
Ciclos que aparece la 1 fisura e/ sustrato e Interfase 1	200	253	254	236
Ciclos que aparece la fisura e/ Capa 1 e Interfase 3	1166	996	1042	1068
Ciclos fisura en superficie	1291	1090	1069	1150

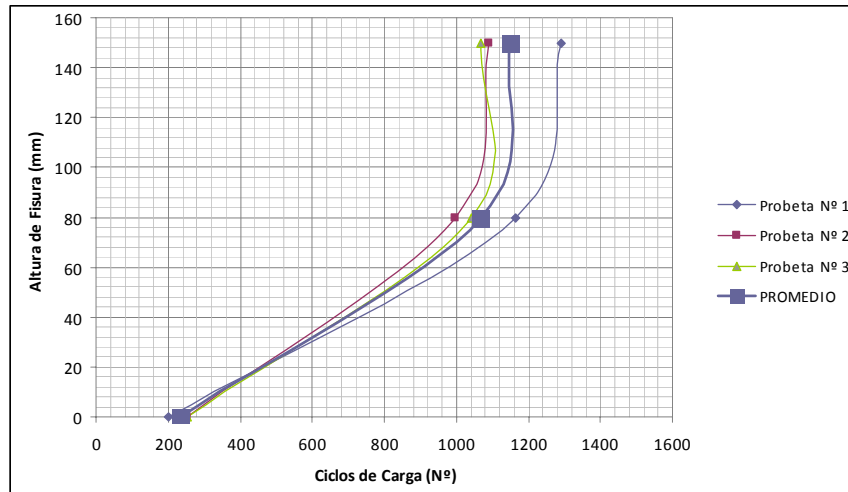


Figura A.14 Flexión por cargas repetidas para el material GR FV

El Sistema 1 se comenzó a fisurar alrededor del ciclo 236 en promedio de tres probetas, apareciendo una fisura en la fibra más traccionada de la capa de mezcla asfáltica inferior.

La fisura tuvo su evolución hasta la interposición del material GR FV con una suave pendiente, llegando al ciclo 1068, al cabo de algunos ciclos la fisura atravesó el material y aceleró su propagación para llegar a la superficie en 1150 ciclos.

Tabla A.5 Paquete estructural evaluado - Sistema 2

Capa	Material	Características	Observaciones
Base pre-fisurada	hormigón	Espesor = 20 mm	-
Interfase 1	riego imprimación	Dotación = 0,90 l/m ²	ECRR-M
Interfase 2	Geocompuesto	espesor = 1,50 mm	FM PP
Carpeta de rodamiento	mezcla asfáltica	Espesor = 150 mm	-

En cuanto a la alternativa propuesta (Sistema 2), no se registró aparición de fisuras hasta los 767 ciclos en promedio en la fibra más traccionada de la capa de mezcla asfáltica de 150 mm de espesor. No obstante ello, la fisura no prosperó quedando en una magnitud inferior a los 10 mm de altura para los 5.000 ciclos.

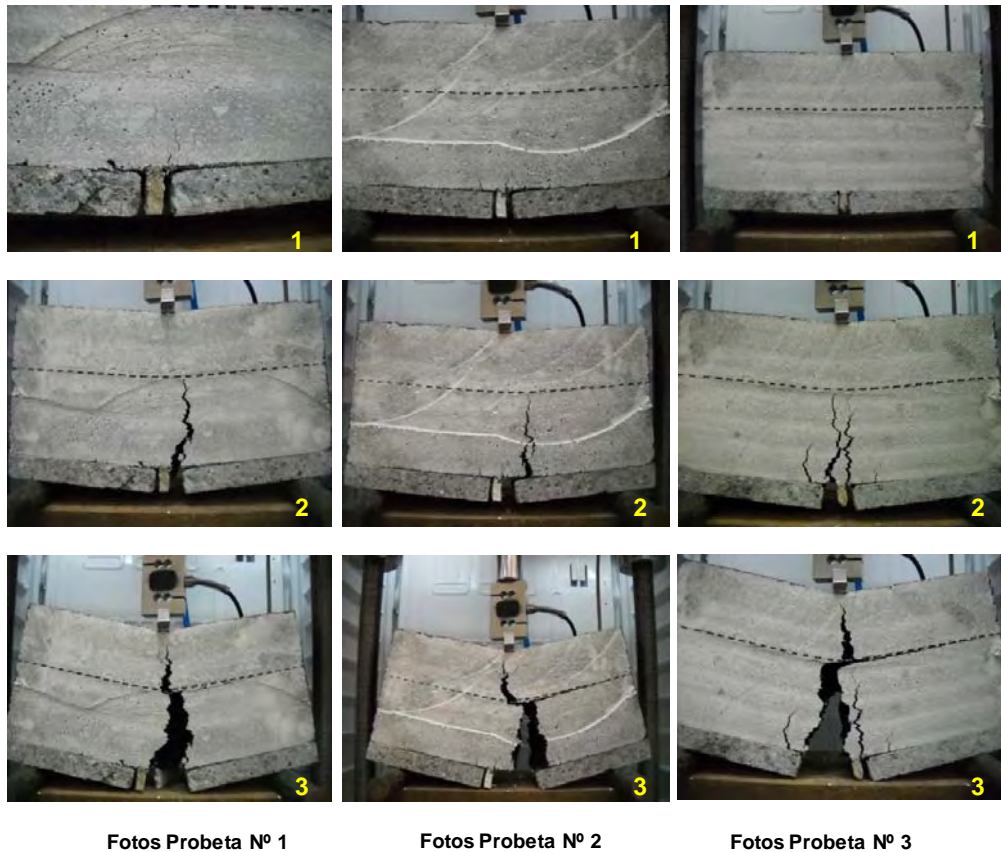


Figura A.15 Secuencia de fisuración para la probeta 1, probeta 2 y probeta 3 para el Sistema 1

Tabla A.6 Resultados a flexión por carga repetida – Sistema 2

Probeta nº	1	2	3	Promedio
Período de climatización	11:00	14:00	17:00	
	13:00	16:00	19:00	
Ciclos que aparece la 1 fisura	900	1000	400	767
Ciclos que aparece la fisura a 8 mm en sustrato	1500	1300	2000	1600
Ciclos que aparece la fisura en la superficie	NO	NO	NO	NO

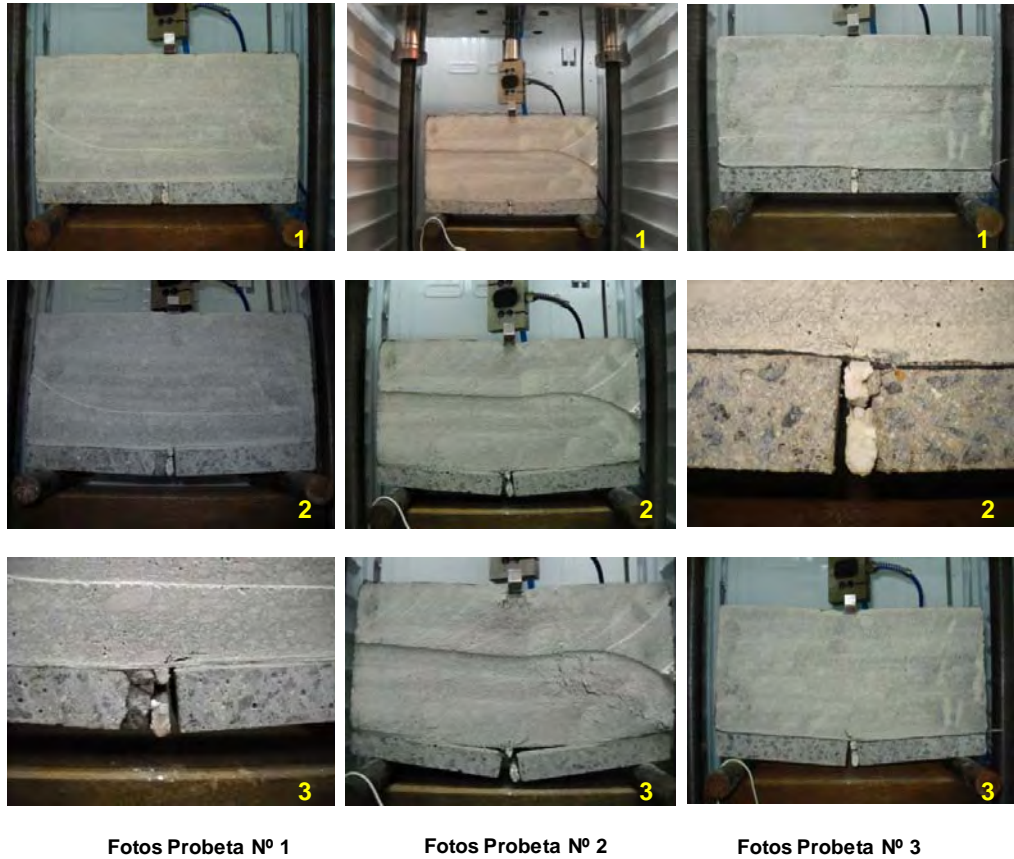


Figura A.16 Secuencia de fisuración para la probeta 1, probeta 2 y probeta 3 para el sistema 2

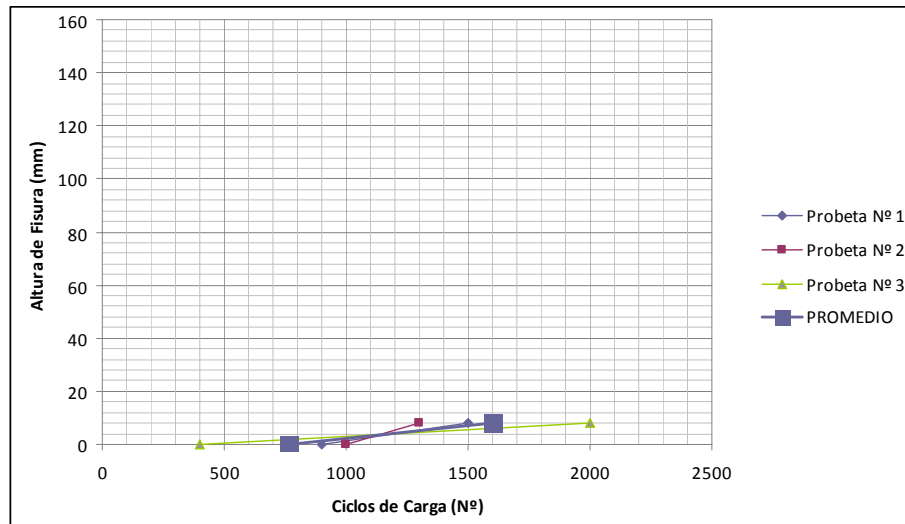
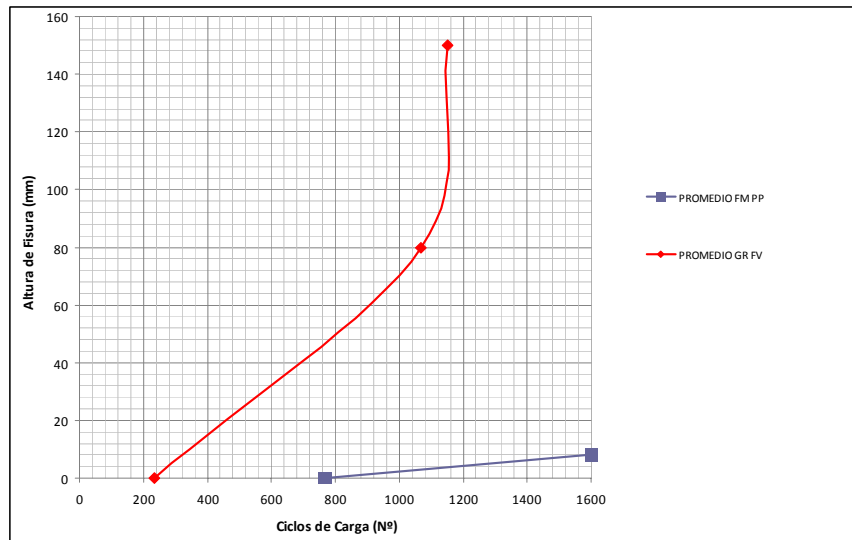


Figura A.17 Flexión por cargas repetidas para el material FM PP

- **Comparativa de los sistemas**



**Figura A.18 Flexión por cargas repetidas;
Comparativa del Sistema 1 y Sistema 2**

A.4 REHABILITACIÓN Y ENSANCHE DE ACCESO A SAN NICOLAS

A4.1 Descripción de la obra

La Municipalidad de San Nicolás decidió la rehabilitación y ensanche del Acceso a San Nicolás, Av. Gral. Perón. Se proyectó en detalle el ensanche considerando una estructura con pavimento flexible, sin embargo la calzada actual es de pavimento de hormigón con un alto grado de fisuración y movimiento bascular de losas.

Tanto el proyecto de ensanche como la estrategia de repavimentación de la calzada existente han sido proyectados por el Municipio.

A través de la empresa a la cual se le ha otorgado el trabajo y la firma fabricante del material geosintético, se ha procurado optimizar el diseño de la rehabilitación promoviendo la utilización de nuevas tecnologías.

A tal fin se ha realizado el análisis de posibles tecnologías en el refuerzo del pavimento, considerando la ecuación técnico - económica más

conveniente. En dicho proceder, se procuró la inclusión del material geocompuesto de 1,5 mm de espesor con capa adherente, fabricado y comercializado por la firma con la cual se ha mantenido el desarrollo del material, a través de la transferencia tecnológica con el laboratorio.

A4.2 Descripción del trabajo

El trabajo consistió, después de analizarse diferentes posibilidades de innovación, las siguientes bases como punto de partida del trabajo.

- El Municipio dispone el cálculo estructural del sobre ancho a ejecutar.
- La unión entre pavimento existente y el ensanche será uno de los puntos críticos a tratar.
- La evaluación de estado actual de las losas arroja como resultado que deben tratarse aproximadamente 18000 m² con 14000 m lineales de fisuras y juntas en el pavimento.
- Que la empresa adjudicataria de la obra ha consultado a distintos especialistas y posee en la actualidad las especificaciones para el tratamiento de las losas existentes, destacándose el recalce de losas con hormigón inyectado, bacheo superficial, bacheo profundo, tomado de fisuras, etc. Por tal razón se dio por sentado en el trabajo que las alternativas analizadas se ejecutan sobre una calzada perfectamente reparada antes de iniciar las tareas de refuerzo.
- La empresa a la cual se le adjudicó la tarea de repavimentación recibió de parte del Municipio el siguiente proyecto de rehabilitación.

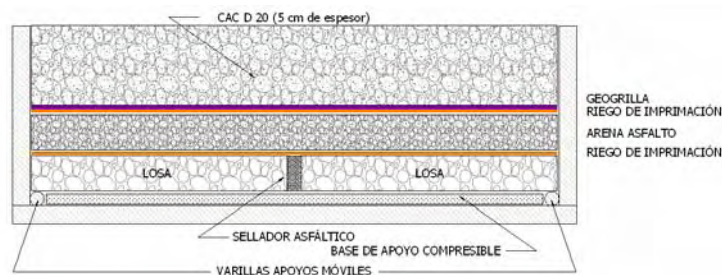


Figura A.19 Sistema propuesto por el Municipio

- Por la experiencia adquirida se decidió analizar, como resultado del debate de ideas, la siguiente alternativa.

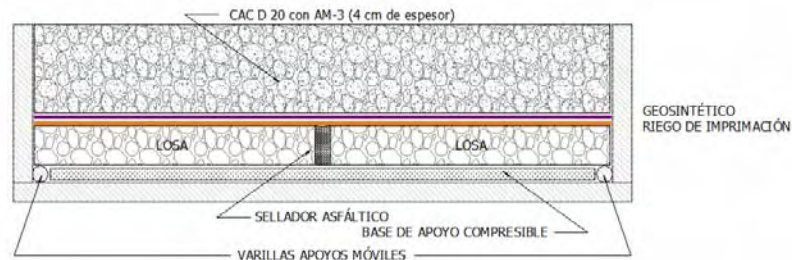


Figura A.20 Sistema propuesto por el laboratorio

Para analizar los sistemas, se utilizó el equipo Wheel Tracking Test, ensayo de rueda de carga, cumpliendo con el Método BS EN 12697-22.

A4.3 Resultados

Como valor comparativo se confeccionaron las Curvas de evolución de fisuras (h_{fisura}) versus tiempo.

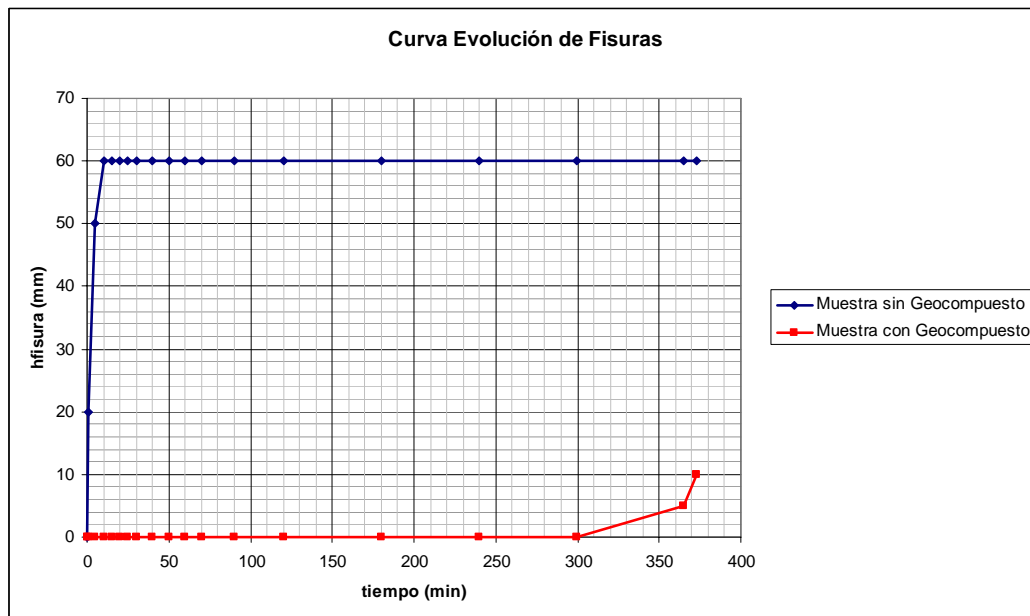


Figura A.21 Curvas de evolución de fisuras

Del análisis comparativo se puede decir que:

El esquema de refuerzo de la propuesta de la Municipalidad se comenzó a fisurar al primer minuto de aplicada la carga, en la fibra más traccionada de la capa de arena asfalto.

Esta manifestó un efectivo acompañamiento de las deformaciones registradas en la losa de base. Sin embargo, la mezcla CAC D20 convencional se ha visto impedida de absorber tales deformaciones tornándose ineficiente al sistema y provocando el colapso por la falta de adherencia entre el material geosintético y la capa de rodadura.

En cuanto a la alternativa propuesta por el laboratorio, no se registró aparición de fisuras hasta los 365 minutos (9916 ciclos) en la fibra más traccionada de la capa asfáltica CAC D20.

En este caso se ha observado un comportamiento solidario de la membrana con la deformación de las losas de base y lo mismo ha hecho la mezcla asfáltica CAC D20 con asfalto modificado. Este comportamiento se presume está dado por la rigidez de la membrana y su correspondencia con la rigidez de la mezcla asfáltica a esta temperatura y también debido a un aumento en la adherencia. La aparición de la fisura en un intervalo de tiempo mucho mayor, tal cual se señalara, evidencia este comportamiento.

ANEXO 2. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

La tesis comenzó en el año 2010 a partir de conocer la problemática del reflejo de fisuras, utilizando materiales geosintéticos en su prevención. La adherencia entre capas fue un punto de importancia por establecer. Esto motivo al estudio en este sentido en la rehabilitación de pavimentos de hormigón, donde la experiencia reciente en obra ha sido el único parámetro de valoración a través del tiempo y donde en algunos casos han resultado fallidas las alternativas adoptadas.

Por ello, durante la investigación se ha realizado los siguientes aportes a la comunidad científica:

1. PUBLICACIONES

- “Evaluación de un geocompuesto como sistema membrana anti-fisura S.A.M.I.”.

Congreso CPA 2010 Comisión Permanente del Asfalto y XXXVI Reunión del asfalto: Bicentenario de los Andes. 29 de noviembre al 3 de diciembre de 2010. Hotel “Circulo Oficiales de Mar”, Buenos Aires. Argentina.

Publicación web:

www.cpasfalto.org/36reunion/Trabajos%20XXXVI%20Reunion%20del%20Asfalto.pdf

Ed. Comisión Permanente del Asfalto

Autores: Delbono L., Botasso G., Rivera J., Fensel E., Ricci L.

- “Rehabilitación de pavimentos con geosintéticos”.

Revista: Revista Vial, Edición Especial N° 10, octubre 2011, págs. 7-11, ISSN: 0329-1146

Publicación web:

http://www.xyros.com.ar/revistas/vial/edicion_especial_10/#/7d0b12a6/7

Autores: Delbono L., Botasso G., Fensel E., Ricci L.

- “Sistema de membrana anti-fisuras con geocompuesto, una metodología de evaluación”.
Revista: Revista Técnica de la Asociación Española de Carreteras. 4ª Época. Edición Nº175, enero/febrero 2011, págs. 50-60, ISSN: 0212-6389
Publicación web:
http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/11/2011_SAMI_Carreteras-175_Espa%C3%B1a.pdf
Autores: Delbono L., Botasso G., Rivera J., Fensel E., Ricci L.
- “Evaluación de distintas membranas tipo S.A.M.I. para rehabilitación de pavimentos asfálticos deteriorados”.
Congreso: CILA 2011 “Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. XVI Reunión del asfalto” 20 al 25 de noviembre de 2011. Río de Janeiro, Brasil.
3, 1881-1892, 2011 (Trabajo IBP 2249_11), Ed. Comisión del Asfalto IBP (Instituto Brasileiro del Petróleo, Gas y Biocombustibles)
Publicación web:
http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/2011_Evaluacion-Membranas-Tipo-SAMI_XVI-CILA_IBP2249_11.pdf
Autores: Delbono L., Botasso G., Fensel E., Ricci L.
- “Modelo dinámico para determinar la eficiencia de distintos geosintéticos usados como anti-reflejo de fisuras”.
Congreso: XVI Congreso argentino de Vialidad y Tránsito. Octubre de 2012, Córdoba, Argentina
Publicación web:
http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2012/10/2012_Modelo-dinamico-AntiReflejo-de-fisuras_XVI-Vialidad-y-Transito_019.pdf
Autores: Delbono L., Botasso G., Fensel E., Ricci L., Rivera J.

- “El uso de geosintéticos en la construcción vial”. Innovaciones en la UTN La Plata. Info-UTN, Publicación de la Facultad Regional La Plata. Número 15. Julio de 2012. La Plata, Bs. As. Argentina.
Publicación web:
http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2012/12/2012_Geosinteticos_Info-UTN_Argentina.pdf
Autores: Delbono L., Botasso G., Fensel E., Ricci L.
- “Geocomposite of national production as anti-reflexive cracking agent. Comparison with other geosynthetic of different polymeric composition”.
Congreso: EUROGEO5 “5 th European Geosynthetic Congress”.
16 al 19 de septiembre de 2012. Valencia, España.
Book of proceedings Volumne 1. Topic Transport.
Publicación web:
http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2012/10/2012_Comparativa-Geosinteticos-como-SAMI_EuroGEO5.pdf
Autores: Delbono L., Botasso G., Fensel E., Ricci L.
- “Solución con Geosintéticos para impedir el reflejo de las juntas de base a una Mezcla Asfáltica de refuerzo en el ensanche de una Avenida Urbana”.
Congreso: CILA 2013 “XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto”. Noviembre de 2013. Antigua, Guatemala
Publicación web:
http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2013/11/2013_Geosinteticos-Impedir-Reflejo-Junta-Base-en-M.Asf.-Ensanche-Avenida_CILA.pdf
Autores: Delbono L., Botasso G., Fensel E., Ricci L.
- “Adherence in a pavement rehabilitated with a polymeric grid used as interlayer”.
Ms. Ref. N° CONBUILDMAT-D-13-02318R1

Revista: Construction and Building materials, ed. Elsevier

Vol. 54 (2014), págs. 454-459, ISSN: 0950-0618

Publicación web:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814000191>

Autores: Delbono L., Giudice C.

2. INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

- Innovación 2010: Valoración de sistemas anti-reflexión de fisuras para la rehabilitación de pavimentos rígidos y flexibles, utilizando sistemas de sollicitación dinámicos de rueda cargada y medición de propagación de fisuras; generada en el marco de la tesis, como proceso de capacitación formal y acuerdo con el sector productivo. Documentación probatoria en el Anuario 2010 del LEMaC, Centro de investigaciones Viales de la UTN-FRLP.
- Transferencia tecnológica 2010: Documento técnico. Acuerdo de transferencia e innovación tecnológica con la Empresa Fameim S. A. "Evaluación de geocompuesto como sistema de membrana anti-fisura S.A.M.I.". Págs. 1-95
Documentación probatoria en el Anuario 2010 del LEMaC, Centro de investigaciones Viales de la UTN-FRLP.
- Transferencia tecnológica 2010: Acuerdo con la empresa Manufactura de fibras sintéticas S. A. (MAFISA S. A.). Valoración de la performance de geosintéticos no tejidos de origen chino, italiano y brasilero; comparación con los estándares de fabricación de la nueva planta a montar en la empresa.
Documentación probatoria en el Anuario 2010 del LEMaC, Centro de investigaciones Viales de la UTN-FRLP.
- Transferencia tecnológica 2011: Documento técnico. Acuerdo de transferencia e innovación tecnológica con la empresa HUESKER

Ltda, Brasil y CORIPA de Argentina. “Evaluación geogrillas de distinta composición polimérica como sistema de membrana anti-reflejo de fisuras”. Págs. 1-9

- Innovación 2012: Modelización de sistemas de sollicitación dinámica, a partir de los ensayos de Wheel Tracking Test y Módulo Dinámico, a efectos de predecir fisuras en los distintos sistemas de pavimentos; generada en el marco de la tesis, como proceso de capacitación formal y acuerdo con el sector productivo.
Documentación probatoria en el Anuario 2012 del LEMaC, Centro de investigaciones Viales de la UTN-FRLP.
- Transferencia tecnológica 2012: Documento técnico. Acuerdo de transferencia e innovación tecnológica con la empresa de manufactura de fibras sintéticas (MAFISA S. A.). “Control de calidad sobre muestras de geosintéticos para inicio de fabricación en el país”.
Documentación probatoria en el Anuario 2012 del LEMaC, Centro de investigaciones Viales de la UTN-FRLP.

3. CUADERNOS

- Cuaderno “Evaluación de Polyfill SRV Espesores Nominales: $e=1,5$ mm y $e= 1,0$ mm (Geocompuesto), como Sistema de Membrana Antifisura S.A.M.I. en Pavimentos Flexibles” (2010).
- Cuaderno “Evaluación de Polyfill SRV como sistema de SAMI” Código: ISBN 978-950-42-0123-6 (Libro) (2010).
- Cuaderno “Evaluación de Polyfill SRV Geocompuesto con capa adherente $e=1,5$ mm, Reflexión de Fisuras por Flexión Simple – Carga Repetida” (2012).

4. CAPACITACIÓN

- Presentación “Soluciones tecnológicas asociadas al uso de geosintéticos en la obra vial”. MATTEAR 2010 “1er encuentro de programa de materiales de la UTN” y “Primer taller de doctorandos en Ingeniería de materiales”.
Fecha: 12 al 14 de mayo del 2010
Lugar: UTN, Facultad Regional San Nicolás, Argentina.
- Participación al 9 th International Conference on Geosynthetic
Fecha: 23 al 27 de mayo de 2010
Lugar: Guarujá, Brasil.
- Participación en las “Primeras jornadas de intercambio y difusión de los resultados de investigaciones de los doctorandos en ingeniería”.
Fecha: 22 y 23 de septiembre de 2010
Lugar: UTN, Facultad Regional Buenos Aires, Argentina.
- Presentación del trabajo “Uso de geocompuestos en la rehabilitación de pavimentos”. VI Seminario Internacional de Pavimentos.
Fecha: 26 al 28 de octubre de 2010
Lugar: Hotel Intercontinental, Santiago de Chile.
- Presentación “Soluciones tecnológicas asociadas al uso de geosintéticos en la obra vial”. Jornada de Ciencia y Tecnología.
Fecha: 12 de octubre de 2011
Lugar: UTN, Facultad Regional La Plata, Argentina.
- Presentación “Evaluación de un geocompuesto de producción nacional como agente anti-reflejo de fisura (sobre pavimentos

rígidos)”. II Workshop de transferencia de tecnología en el área de materiales.

Fecha: 28 al 30 de noviembre de 2011

Lugar: Hotel UTHGRA Sasso, Mar del Plata, Argentina.

- Asistente y colaborador en el I Seminario Argentino sobre Aplicación de Geosintéticos.

Dirección Web:

http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/08/Nota-IGS_VialArgentina.pdf

Fecha: 13 y 14 de junio de 2011

Lugar: Centro Cultural Borges, Bs. As., Argentina.

- Presentación del póster “Evaluación de nuevo material, de producción nacional, como sistema S.A.M.I. en rehabilitación de pavimentos”. MATTEAR 2012 “2do encuentro de programa de materiales de la UTN”.

Fecha: 28 al 30 de mayo del 2012

Lugar: UTN, Facultad Regional San Rafael (Mendoza), Argentina.

- Presentación de avance de la tesis doctoral en el “Segundo taller de doctorandos en Ingeniería de materiales”.

Fecha: 28 al 30 de mayo del 2012

Lugar: UTN, Facultad Regional San Rafael (Mendoza), Argentina.

- Asistencia a las “Segundas jornadas de intercambio y difusión de los resultados de investigaciones de los doctorandos en ingeniería”.

Fecha: 22 y 23 de Agosto de 2012

Lugar: UTN, Facultad Regional Córdoba, Argentina.

- Presentación del trabajo “Geocompuesto de producción nacional como agente anti-reflejo de fisura. Comparativa con otros

geosintéticos de diferente composición polimérica”. EUROGEO5. 5th European Geosynthetic Congress. Fecha: 16/09 al 19/09 de 2012. Valencia, España.

- Seminario de capacitación: Curso Educando Educadores, organizado por la asociación argentina de Geosintéticos y la Sociedad Argentina de Ingeniería Geotécnica. Fecha 26 al 28 de mayo de 2013. Villa Carlos Paz, Córdoba. Argentina.
- Taller teórico-práctico de capacitación: Curso El módulo dinámico en mezclas asfálticas y su importancia en el aporte estructural de las mismas. Fecha 27 de junio de 2013. LEMaC-Centro de Investigaciones Viales de la UTN-FRLP.
- Jornada de ciencia y tecnología 2013: presentación del poster: Comportamiento de grillas poliméricas en sistemas anti-reflejo de fisuras sometidas a sollicitaciones dinámicas. Fecha de octubre de 2013. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata.
- Presentación del trabajo “Solución con Geosintéticos para impedir el reflejo de las juntas de base a una Mezcla Asfáltica de refuerzo en el ensanche de una Avenida Urbana”. XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Fecha: 18/11 al 22/11 de 2013. Ciudad Antigua, Guatemala.
- Presentación del trabajo “Estudio de desempeño de geosintético para refuerzo de concretos asfálticos a través de compresión diametral”. XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Fecha: 18/11 al 22/11 de 2013. Ciudad Antigua, Guatemala.

5. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

- Dictado de la conferencia “Uso de geosintéticos en sistema anti-reflexión de fisuras”. 3 de noviembre de 2010.
Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata
- Docente de curso de Capacitación: “Ingeniería de Pavimentos Urbanos”.
Destinatarios: Cuerpo de Inspectores de los Municipios de La Plata, Berisso y Ensenada.
Carga Horaria: 48 horas
Modalidad: Teórico Práctico con Evaluación Opcional.
Lugar y Fecha: UTN, Facultad Regional La Plata, mayo a Septiembre de 2010.
- Director de Tesis de investigación; trabajo “Valoración de la adherencia en intercapas mediante el uso de geosintéticos como sistema retardador de fisura refleja”.
Becario: Cepeda, Luciano
Fecha: 23 de abril de 2011
Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata
- Docente en seminario teórico-práctico de capacitación de posgrado “Construcción de subterráneos, fabricación y colocación de emulsiones, centro de control de tránsito y peajes y laboratorio de control de calidad de obras viales”. Dictado a alumnos del programa Máster en Ingeniería Civil, mención ingeniería vial de la Universidad de Piura - Campus Lima. 1 al 5 de octubre de 2012.
Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata
- Docente en seminario teórico-práctico de capacitación de posgrado, con actividades en obras de infraestructura vial, sistema

de operación de tránsito, plantas de fabricación de productos asfálticos y laboratorios viales. 16 al 20 de abril de 2012.

Carga horaria: 60 horas

- Dictado de la conferencia “Geosintético: tipos, aplicaciones y control de calidad”. 5 de julio de 2012.

Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata

- Director de Tesis de investigación; trabajo “adherencia entre distintos sustratos interponiendo producto geosintético”.

Becario: Cepeda, Luciano

Fecha: 17 de abril de 2012

Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata

- Dictado de curso de especialización teórico-experimental para el desarrollo de la tesis “Estudio de una Geogrilla en refuerzos asfálticos a través de compresión diametral”.

Becario: Arnau, Daniel

Fecha: 3 al 27 de febrero de 2013

Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata

- Director de Tesis de investigación; trabajo “Valoración de la acción de Geosintéticos entre capas de Hormigón para Pavimentos”.

Becario: Rossi, Javier

Fecha: Marzo a diciembre de 2013

Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata

- Director de Tesis de investigación; trabajo “Evaluación de la resistencia a tracción de geotextiles no tejidos embebidos con emulsión asfáltica mediante Grab Test”.

Becario: Cedrik, Soledad

Fecha: Marzo a diciembre de 2013

Lugar: LEMaC – Centro de Investigaciones Viales, La Plata