

Asfaltos altamente modificados con polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja



Adrián Noel Segura

**Asfaltos altamente modificados con  
polvo de neumáticos fuera de uso  
(NFU) en mezclas asfálticas  
retardantes de la fisuración refleja.**

**Tesis doctoral**

**Doctorado en ingeniería mención  
materiales**

Para optar por el título de:

Doctor en Ingeniería Mención Materiales

Resolución CONEAU RESFC-573/16

Universidad Tecnológica Nacional.

Facultad Regional Córdoba

Segura, Adrián Noel

Asfaltos altamente modificados con polvo de neumáticos fuera de uso -NFU- en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja / Adrián Noel Segura ; Dirigido por Gerardo Botasso ; Belén Raggiotti ; Editado por Fernando Cejas. - 1a ed - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2024.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-8992-40-2

1. Asfalto. 2. Neumático. 3. Fisura. 4. Tesis doctorado. I. Botasso, Gerardo , dir. II. Raggiotti, Belén, dir. III. Cejas, Fernando, ed. IV. Título.

CDD 625.8

Diseño de Tapa e interior: Fernando Cejas



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Rubén Soro

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretaria Cultura y Extensión Universitaria: Ing. Federico Olivo Aneiros



Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba

Decano: Ing. Héctor Macaño

Vicedecano: Ing. Jorge Abet



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando Cejas

Dirección General: Mg. Claudio Véliz

Dirección de Cultura y Comunicación: Ing. Pablo Lassave

Queda hecho el depósito que marca la Ley  
Nº 11.723

© edUTecNe, 2024

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ)

Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina

ISBN 978-987-8992-40-2



*Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.*

## Tesis doctoral

Doctorado en ingeniería mención materiales

Asfaltos altamente modificados con polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja

**Doctorando:** Mg. Ing. Adrián Noel Segura

**Director:** Dr. Mg. Ing. Gerardo Botasso

**Codirectora:** Dra. Ing. Belén Raggiotti

**Jurados:**

Dr. Ing. Roberto Lucci

Dr. Mg. Ing. Fernando Martínez

Dr. Ing. Adrián Nosetti

Para optar por el título de:

Doctor en Ingeniería Mención Materiales

Resolución CONEAU RESFC-573/16



# Agradecimientos

---

A los directores, Gerardo Botasso y Belén Raggiotti que incansablemente han aportado su valiosa dirección, para la realización de esta tesis.

A la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata y Regional Córdoba por todo el apoyo, trabajo y por facilitar sus instalaciones y equipamiento.

A los docentes, compañeros, integrantes y amigos de los centros de investigación CINTEMAC y LEMAC que, con la invaluable y considerable colaboración de ellos, han permitido la concreción de esta experiencia.

A los jurados, referentes académicos y en el área vial, que con su participación y aportes prestigian este documento.

A mi familia, amigos que durante la formación y materialización de esta tesis contribuyeron directa o indirectamente a la búsqueda del título de Doctor en Ingeniería, Mención Materiales.



<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</b>	<b>13</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 01: INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
RESUMEN	19
1.1 PROBLEMÁTICA	19
1.2 ANTECEDENTES	21
1.3 JUSTIFICACIÓN	23
1.4 HIPÓTESIS	27
1.5 OBJETIVO DE LA TESIS	27
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	27
1.8 REFERENCIAS	29
<b>CAPÍTULO 02: NEUMÁTICOS FUERA DE USO SUS CARACTERÍSTICAS Y LA CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE ELLOS UTILIZADO</b>	<b>31</b>
RESUMEN	31
2.1 EL CAUCHO	31
2.1.1. CAUCHO NATURAL	31
2.1.2. CAUCHO SINTÉTICO	33
2.2 NEUMÁTICOS	38
2.2.1. PARTES DEL NEUMÁTICO	41
2.2.2. TIPOS DE NEUMÁTICOS Y SU FABRICACIÓN	42
2.2.3. LA INDUSTRIA DE LOS NEUMÁTICOS	43
2.2.4. GENERACIÓN DE NEUMÁTICOS	45
2.3 AMBIENTE	46
2.3.1. DESARROLLO SOSTENIBLE	46
2.3.2. NEUMÁTICOS Y SUS EFECTOS EN EL AMBIENTE	48
2.3.3. ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN	49
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE NEUMÁTICO SELECCIONADO	52

**2.5 REFERENCIAS 55****CAPÍTULO 03: PAVIMENTOS FLEXIBLES: SUS DETERIOROS, REHABILITACIÓN Y MODELO DE REFLEJO DE FISURAS UTILIZADO 59**

<b>RESUMEN</b>	<b>59</b>
<b>3.1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>60</b>
3.1.1. FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES	61
3.1.2. FISURACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES	62
<b>3.2 REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS</b>	<b>66</b>
3.2.1. ALTERNATIVAS DE REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL	67
3.2.2. CAPAS INTERMEDIAS COMO RETARDO DE FISURAS REFLEJAS	67
3.2.3. ADHERENCIA ENTRE CAPAS	69
3.2.4. ADHERENCIA EN LA INTERFASE	69
3.2.5. RIEGO DE ADHERENCIA CON EMULSIONES ASFÁLTICAS	70
3.2.6. EMULSIÓN UTILIZADA EN LA TESIS	72
<b>3.3 FORMACIÓN Y PROPAGACIÓN DE FISURAS A LA CAPA DE RODADURA</b>	<b>73</b>
3.3.1. MODOS DE GENERACIÓN DE UNA FISURA	75
3.3.2. FORMA EN QUE SE PRODUCE LA REFLEXIÓN DE FISURA	76
3.3.3. MÉTODO ANALÍTICO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS	78
<b>3.4 MODELOS DE ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE FISURAS</b>	<b>79</b>
3.4.1. EQUIPOS Y ENSAYOS PARA VALORAR EL CRECIMIENTO DE FISURAS	79
3.4.2. MODELO DE REFLEJO DE FISURAS UTILIZADO PARA ESTA TESIS	85
3.4.3. CONFECCIÓN DE PROBETAS DE LA TESIS	87
3.4.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LA TESIS	91
<b>3.5 REFERENCIAS</b>	<b>95</b>

**CAPÍTULO 04: LIGANTES ASFÁLTICOS CON INCORPORACIÓN DE ALTA TASA DE NFU 99**

<b>RESUMEN</b>	<b>99</b>
<b>4.1 ASFALTOS CON INCORPORACIÓN DE POLVO DE NFU</b>	<b>99</b>
4.1.1. LIGANTES BASE UTILIZADOS	100
4.1.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LIGANTES BASES	107
4.1.3. TÉCNICAS DE INCORPORACIÓN DEL POLVO DE NFU	108
4.1.4. NORMATIVA Y GUÍAS DE CARACTERIZACIÓN	112
4.1.5. REOLOGÍA	115
<b>4.2 OBTENCIÓN DEL ASFALTO CON ELEVADA TASA DE POLVO DE NFU</b>	<b>124</b>
4.2.1. DISPERSIONES REALIZADAS EN ASFALTOS CA 10, CA 20 Y CA30	124
4.2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISPERSIONES	125
4.2.3. ELABORACIÓN Y RESULTADOS DE ASFALTO CON ALTA TASA DE NFU, REALIZADO EN LABORATORIO VIAL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.	126
4.2.4. CRITERIO DE ADOPCIÓN DEL ASFALTO CON ALTA TASA DE NFU	128
4.2.5. BARRIDO DE TEMPERATURA	130
4.2.6. DETERMINACIÓN DE CURVA DE INTEGRIDAD DEL MATERIAL VS INTENSIDAD DEL DAÑO	133
4.2.7. CÁLCULO DE CANTIDAD DE CICLOS A FALLA VS DEFORMACIÓN	134
<b>4.3 REFERENCIAS</b>	<b>136</b>

**CAPÍTULO 05: MEZCLAS ASFÁLTICAS RETARDANTES DE LA FISURACIÓN REFLEJA** **141**

<b>RESUMEN</b>	<b>141</b>
<b>5.1 GRANULOMETRÍAS Y MEZCLAS USADAS PARA RETARDO DE FISURAS</b>	<b>142</b>
5.1.1. ARENA - ASFALTO	144
5.1.2. MICROAGLOMERADO ASFÁLTICO EN CALIENTE	145
5.1.3. MEZCLA CEDEX	146
5.1.4. DISEÑO: ENSAYOS MECÁNICOS Y VOLUMÉTRICOS	147
5.1.5. DISEÑO: MEDICIÓN DE AHUELLAMIENTO, MÓDULO Y RESISTENCIA A DAÑOS POR HUMEDAD INDUCIDOS	151
5.1.6. MEZCLAS REALIZADAS EN LABORATORIO VIAL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID	153
<b>5.2 EVALUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE FISURAS</b>	<b>159</b>
5.2.1. RESULTADOS EN LAS MEZCLAS: ARENAS ASFALTO, MICROAGLOMERADO ASFÁLTICO EN CALIENTE Y CEDEX	160
5.2.2. ANÁLISIS ENTRE CICLOS A ROTURA Y MÓDULO DE LAS MEZCLAS	164
5.2.3. ANÁLISIS ENTRE CICLOS A ROTURA Y RELACIONES VOLUMÉTRICAS	164
5.2.4. ANÁLISIS ENTRE CICLOS A ROTURA Y LAS DETERMINACIONES REOLÓGICAS EN LOS LIGANTES: BARRIDO DE TEMPERATURA, BARRIDO DE AMPLITUD, INTEGRIDAD DEL MATERIAL VS INTENSIDAD DEL DAÑO Y CICLOS HASTA LA FALLA VS DEFORMACIÓN	165
<b>5.3 REFERENCIAS</b>	<b>167</b>

**CAPÍTULO 06: CONCLUSIONES** **171**

<b>RESUMEN</b>	<b>171</b>
<b>6.1 CONSIDERACIONES GENERALES</b>	<b>171</b>
<b>6.2 CONCLUSIONES</b>	<b>172</b>
6.2.1. RELACIONADAS CON EL OBJETIVO GENERAL	172
6.2.2. RELACIONADAS CON LOS ASFALTOS CON ALTA TASA DE NFU	172
6.2.3. RELACIONADAS CON LAS MEZCLAS EVALUADAS PARA RETARDO DE FISURAS REFLEJAS	175
<b>6.3 PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN A FUTURO</b>	<b>179</b>

**ANEXO I:** **181**

**PRODUCCIÓN CIENTÍFICA** **181**

<b>PUBLICACIONES</b>	<b>181</b>
<b>PRODUCCIONES Y BECAS</b>	<b>183</b>
<b>CAPACITACIÓN DICTADA Y TRANSFERENCIA</b>	<b>184</b>
<b>FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS</b>	<b>186</b>
<b>CURSOS DE FORMACIÓN ACREDITADOS EN EL DOCTORADO</b>	<b>188</b>



# Índice de tablas

## **CAPÍTULO 02: NEUMÁTICOS FUERA DE USO SUS CARACTERÍSTICAS Y LA CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE ELLOS UTILIZADO** **31**

TABLA 2.1. VALORES ESPERADOS EN ASPECTOS FÍSICOS DEL POLVO DE NFU	52
TABLA 2.2. ENTORNOS GRANULOMÉTRICOS DEL POLVO DE NFU	53
TABLA 2.3. GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA UTILIZADA	53
TABLA 2.4. ENSAYOS FÍSICOS DE LA MUESTRA DE POLVO DE NFU UTILIZADA	54

## **CAPÍTULO 03: PAVIMENTOS FLEXIBLES: SUS DETERIOROS, REHABILITACIÓN Y MODELO DE REFLEJO DE FISURAS UTILIZADO** **59**

TABLA 3.1. ESPECIFICACIONES EMULSIÓN UTILIZADA Y EXIGENCIA DE IRAM 6698 (2006).	73
TABLA 3.2. RESUMEN DE SECUENCIA DE PASOS Y CAPAS ASFÁLTICAS PARA CONFECCIÓN DE PROBETAS.	91

## **CAPÍTULO 04: LIGANTES ASFÁLTICOS CON INCORPORACIÓN DE ALTA TASA DE NFU** **99**

TABLA 4.1. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON LA VISCOSIDAD A 60 °C.	101
TABLA 4.2. CLASIFICACIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS DE USO VIAL.	103
TABLA 4.3. DENOMINACIÓN DE LOS ASFALTOS UTILIZADOS.	108
TABLA 4.4. ENSAYOS EN ASFALTOS BASE.	108
TABLA 4.5. BETUNES MODIFICADOS DE ALTA VISCOSIDAD CON CAUCHO.	113
TABLA 4.6. BETÚN MODIFICADO DE ALTA VISCOSIDAD CON CAUCHO, BLANDO.	114
TABLA 4.7. REQUISITOS DE LOS ASFALTOS CON INCLUSIÓN DE CAUCHO.	115
TABLA 4.8. DISPERSIONES DE LIGANTES Y NFU.	124
TABLA 4.9. RESULTADOS DE ENSAYOS EN LAS DISPERSIONES	125
TABLA 4.10. RESULTADOS DE ENSAYOS EN LIGANTES UTILIZADOS EN EXPERIENCIA UPM.	127
TABLA 4.11. RESUMEN DE VALORES LÍMITES DE LAS ESPECIFICACIONES UTILIZADOS.	128
TABLA 4.12. BARRIDO DE TEMPERATURA.	131

## **CAPÍTULO 05: MEZCLAS ASFÁLTICAS RETARDANTES DE LA FISURACIÓN REFLEJA** **141**

TABLA 5.1. RESULTADOS DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS UTILIZADOS.	144
TABLA 5.2. DESIGNACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS.	147
TABLA 5.3. PARÁMETROS SEGÚN REFERENCIAS PARA LA AA.	147
TABLA 5.4. PARÁMETROS SEGÚN REFERENCIAS PARA EL MAC.	147
TABLA 5.5. PARÁMETROS SEGÚN REFERENCIAS PARA CEDEX.	148
TABLA 5.6. PARÁMETROS SEGÚN REFERENCIA PARA CAC D19.	148
TABLA 5.7. RESUMEN DE LAS MEZCLAS MAC REALIZADAS.	150
TABLA 5.8. RESUMEN DE LAS MEZCLAS CEDEX REALIZADAS.	150

TABLA 5.9. RESUMEN DE LAS MEZCLAS AA REALIZADAS.	150
TABLA 5.10. RESUMEN DE LAS MEZCLAS CAC D19.	150
TABLA 5.11. PORCENTAJE ÓPTIMO DE LIGANTE Y ENSAYOS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	150
TABLA 5.12. RESULTADOS EN LAS MEZCLAS DE AHUELLAMIENTO, MÓDULO Y TSR.	152
TABLA 5.13. RESULTADO DE ENSAYOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS.	157
TABLA 5.14. RESULTADOS DE ENSAYO A PROPAGACIÓN DE FISURA EN TODAS LAS MEZCLAS ESTUDIADAS.	161

# Índice de figuras

## **CAPÍTULO 02: NEUMÁTICOS FUERA DE USO SUS CARACTERÍSTICAS Y LA CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE ELLOS UTILIZADO** **31**

FIGURA 2.1. ESQUEMA DE PARTES DE UN NEUMÁTICO.	42
FIGURA 2.2. TRITURACIÓN DE NFU EN ARGENTINA.	46
FIGURA 2.3. ETAPAS DE RECAUCHUTAJE DE NEUMÁTICOS.	49
FIGURA 2.4. IMAGEN DE PLANTA DE TRITURADO DE NFU.	50
FIGURA 2.5. INSTALACIÓN CRIOGÉNESIS PARA CAUCHO.	51
FIGURA 2.6. MUESTRA DE POLVO DE NFU.	53

## **CAPÍTULO 03: PAVIMENTOS FLEXIBLES: SUS DETERIOROS, REHABILITACIÓN Y MODELO DE REFLEJO DE FISURAS UTILIZADO** **59**

FIGURA 3.1. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE. A) ESQUEMA CORTE. B) ESQUEMA LONGITUDINAL.	60
FIGURA 3.2. FISURACIÓN POR BLOQUES POR CICLOS TÉRMICOS DIARIOS.	63
FIGURA 3.3. FISURACIÓN POR FATIGA EN HUELLA DERECHA DE CALZADA.	64
FIGURA 3.4. FISURACIÓN POR REFLEJO DE FISURAS.	64
FIGURA 3.5. FISURAS DE BORDE.	65
FIGURA 3.6. FISURA LONGITUDINAL.	65
FIGURA 3.7. ZONA REPARADA EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.	66
FIGURA 3.8. ESQUEMAS DE REHABILITACIONES. A) NUEVA CAPA LUEGO DE ELIMINAR LA DETERIORADA. B) NUEVA CAPA SOBRE LA DETERIORADA. C) RECICLADO.	67
FIGURA 3.9. ESQUEMA CAPAS INTERMEDIAS. A) BASE GRANULAR. B) CAPA. C) GEOSINTÉTICO.	67
FIGURA 3.10. REFLEJO EN VARIAS MICRO FISURAS.	68
FIGURA 3.11. REDIRECCIONAMIENTO DE LA FISURA.	68
FIGURA 3.12. REDIRECCIONADO DE LA FISURA Y ATRASO DE LA REFLEXIÓN.	68
FIGURA 3.13. EMULSIÓN UTILIZADA EN LA EXPERIENCIA.	72
FIGURA 3.14 MECANISMO DE PROPAGACIÓN DE FISURA.	75
FIGURA 3.15. MODOS EN QUE SE PRODUCE LA FISURA.	76
FIGURA 3.16 TENSIONES EN LA EXTREMIDAD DE LA FISURA CON EL PASO DE UNA CARGA DE RUEDA.	77
FIGURA 3.17. SOLICITACIONES EXPERIMENTADAS POR LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.	77
FIGURA 3.18. WHEEL TRACKING TEST (WRC).	80
FIGURA 3.19. PROBADOR PAVEMENT RUTTING (LCPC).	80
FIGURA 3.20. HAMBURGO WHEEL TRACKING DEVICE (HWTD).	81
FIGURA 3.21. UNIVERSITY COLLEGE OF DUBLIN (UCD).	81
FIGURA 3.22. WHEEL TRACKING TEST (WTT).	82
FIGURA 3.23. EQUIPO DE CARGA CÍCLICA (ECC).	82
FIGURA 3.24. EQUIPO LRPC D'AUTUN.	83
FIGURA 3.25. EQUIPO TEST SET UP.	83
FIGURA 3.26. EQUIPO DE CARGA CÍCLICA IMAE.	84
FIGURA 3.27. EQUIPO MEFISTO.	84

FIGURA 3.28. EQUIPO MTS.	85
FIGURA 3.29. EQUIPO POR CARGAS REPETIDAS IMPLEMENTADO.	85
FIGURA 3.30. ESQUEMAS. A) PROBETA B) DETALLE DE ENTALLADURA.	86
FIGURA 3.31. APOYOS Y APLICACIÓN DE LA CARGA EN VIGA.	87
FIGURA 3.32. A) MOLDE DE EQUIPO WTT. B) ROLLER COMPACT PARA COMPACTACIÓN DE CAPAS. B) ASERRADORA PARA CORTE DE PROBETAS.	87
FIGURA 3.33. PROBETA POSTERIOR A ENSAYO DE AHUELLAMIENTO DEL PROCESO DE DOSIFICACIÓN. LATERALES MARCADOS PARA ASERRAR.	88
FIGURA 3.34. COMPACTACIÓN CON PERCUTOR ELÉCTRICO DE CAPA INFERIOR.	89
FIGURA 3.35. A) APLICACIÓN DE EMULSIÓN. B) CANTIDAD DE EMULSIÓN COLOCADA.	89
FIGURA 3.36. CAPAS INTERMEDIAS DE RETARDO DE FISURAS DE TRES TIPOS DE MEZCLAS ESTUDIADAS.	90
FIGURA 3.37. A) COLOCACIÓN DE SOBRE MOLDE. B) LLENADO DE TERCERA CAPA. C) COMPACTACIÓN DE ÚLTIMA CAPA.	90
FIGURA 3.38. ESQUEMA DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO ADOPTADA PARA EL ANÁLISIS DE LA CARGA DE SOLICITACIÓN.	92
FIGURA 3.39. ESQUEMA DE MODELIZACIÓN DE PROBETAS DE 5 CM DE ESPESOR.	92

## **CAPÍTULO 04: LIGANTES ASFÁLTICOS CON INCORPORACIÓN DE ALTA TASA DE NFU** **99**

FIGURA 4.1. PENETRÓMETRO.	104
FIGURA 4.2. A) MUESTRAS EN ANILLOS. B) ENSAYO EN PROCESO.	105
FIGURA 4.3. ENSAYO VISCOSIDAD ROTACIONAL. A) PREPARACIÓN MUESTRAS. B) EQUIPO. C) ESQUEMA DE ENSAYO.	106
FIGURA 4.4. ENSAYO RECUPERACIÓN. A) TORSIONAL. B Y C) LINEAL.	107
FIGURA 4.5. MEZCLADOR DE HÉLICE.	110
FIGURA 4.6. DISPERSOR UTILIZADO. A) EQUIPO. B) ROTOR Y ESTATOR.	110
FIGURA 4.7. MEZCLADORES. A) PALETAS. B) DISCO COWLES. C) RECIPIENTE. D) ROTOR ESTATOR CON CIZALLA.	111
FIGURA 4.8. POLVO DE NFU ACTIVADO.	112
FIGURA 4.9. SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA EN ASFALTOS.	118
FIGURA 4.10. ESFUERZO DE CORTE Y DEFORMACIÓN ASOCIADA EN EL DSR.	119
FIGURA 4.11. A) REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO. B) PLACA Ø25 MM, MUESTRA ASFALTO CON NFU.	120
FIGURA 4.12. DISPERSIÓN DE NFU EN ASFALTO.	124
FIGURA 4.13. DISPERSIÓN EN UPM. A) POLVO DE NFU. B) MEZCLADO PREVIO. C) EQUIPO DISPERSOR.	127
FIGURA 4.14. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS EN UPM. A) VISCOSIDAD. B) PENETRACIÓN. C) PUNTO DE ABLANDAMIENTO. D) RETORNO LINEAL.	127
FIGURA 4.15. RESULTADOS DE PENETRACIÓN EN TODAS LAS DISPERSIONES REALIZADAS Y VALORES LÍMITES.	128
FIGURA 4.16. RESULTADOS DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO EN TODAS LAS DISPERSIONES REALIZADAS Y VALORES LÍMITES.	129
FIGURA 4.18. RESULTADOS DE VISCOSIDAD A 170 °C EN TODAS LAS DISPERSIONES REALIZADAS Y VALORES LÍMITES.	129
FIGURA 4.19. BARRIDO DE TEMPERATURA.	131
FIGURA 4.20. GEOMETRÍA UTILIZADA PARA PRUEBA LAS.	132
FIGURA 4.21. GRÁFICO DE BARRIDO DE AMPLITUD.	133
FIGURA 4.22. GRÁFICO C-S.	134

FIGURA 4.23. GRÁFICO CANTIDAD DE CICLOS A FALLA EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN. 135

**CAPÍTULO 05: MEZCLAS ASFÁLTICAS RETARDANTES DE LA FISURACIÓN REFLEJA** 141

FIGURA 5.1. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA. A Y B) CUARTEO. C) TAMIZADO.	144
FIGURA 5.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE AA ANALIZADAS Y ADOPTADA.	145
FIGURA 5.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE MAC ANALIZADAS Y ADOPTADA.	146
FIGURA 5.4. CURVA GRANULOMÉTRICA CEDEX ADOPTADA.	146
FIGURA 5.5. ELABORACIÓN DE MEZCLA. A) INCORPORACIÓN DEL LIGANTE A LOS AGREGADOS. B) PROCESO DE MEZCLADO.	149
FIGURA 5.6. PROBETAS REALIZADAS DE LAS DIFERENTES MEZCLAS.	149
FIGURA 5.7. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO. A) PROBETA. B) ENSAYO EN PROCESO.	151
FIGURA 5.8. ENSAYO DE MÓDULO. A) EQUIPO COMPLETO. B) PROBETA EN ENSAYO.	152
FIGURA 5.9. A) ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS. B) SATURACIÓN DE PROBETAS. C) ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA DE PROBETAS.	152
FIGURA 5.10. CURVAS DE ENSAYO DE AHUELLAMIENTO DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS.	153
FIGURA 5.11. GRANULOMETRÍAS DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS EN LA ESTANCIA EN UPM.	154
FIGURA 5.12. PREPARACIÓN DE AGREGADOS PARA PROBETAS MARSHALL EN UPM	155
FIGURA 5.13. UPM. A) LLENADO DE MOLDES. B) COMPACTACIÓN MARSHALL. C) DETERMINACIÓN DENSIDAD MARSHALL. D) DETERMINACIÓN DENSIDAD MÁXIMA.	155
FIGURA 5.14. UPM. A) ELABORACIÓN PROBETAS SEMICIRCULARES. B) PROBETAS ASERRADAS EN LA MITAD	155
FIGURA 5.15. ENSAYO SENSIBILIDAD AL AGUA EN UPM. A) ACONDICIONAMIENTO. B) ENSAYO.	156
FIGURA 5.16. ENSAYO MÓDULO EN UPM. A) PROBETA EN ENSAYO. B) PANTALLA DE SOFTWARE Y RESULTADOS.	156
FIGURA 5.17. ENSAYO PROPAGACIÓN DE LA FISURA MEDIANTE ENSAYO A FLEXIÓN DE UNA PROBETA SEMICIRCULAR EN UPM.	156
FIGURA 5.18. CURVAS DE REGRESIÓN DE RESULTADOS A PROPAGACIÓN DE LA FISURA MEDIANTE FLEXIÓN, DE CUATRO PROBETAS SEMICIRCULARES. TEMPERATURA DE ENSAYO: 5 °C.	157
FIGURA 5.19. CURVAS DE REGRESIÓN DE RESULTADOS A PROPAGACIÓN DE LA FISURA MEDIANTE FLEXIÓN, DE CUATRO PROBETAS SEMICIRCULARES. TEMPERATURA DE ENSAYO: 20 °C.	158
FIGURA 5.20. ENSAYO A PROPAGACIÓN DE FISURAS EN PROBETAS PREVIAS. A) CORTE DE PROBETAS RECTANGULARES. B) EQUIPO DE ENSAYO. C) ENSAYO EN PROCESO.	160
FIGURA 5.21. ENSAYO PROBETAS MODELO CON DIFERENTES MEZCLAS EN CAPA CENTRAL. A) AA CA30. B) AA AM3. C) AA NFU.	162
FIGURA 5.22. ENSAYO PROBETAS MODELO CON DIFERENTES MEZCLAS EN CAPA CENTRAL. A) MAC AM3. B) MAC NFU.	162
FIGURA 5.23. RESULTADOS DE ENSAYO DE PROBETAS MODELO DE LAS DISTINTAS MEZCLAS.	162
FIGURA 5.24. RESULTADOS DE ENSAYO DE PROBETAS MODELO DE LAS DISTINTAS MEZCLAS, CURVAS DE EVOLUCIÓN DE FISURAS.	163
FIGURA 5.25. VISTA PROBETA LUEGO DE ROTURA. A) CAPA INTERMEDIA AA CA30. B) CAPA INTERMEDIA MAC NFU.	163

<b>FIGURA 5.26. RELACIÓN ENTRE CICLOS A ROTURA Y MÓDULO.</b>	<b>164</b>
<b>FIGURA 5.27. RELACIÓN ENTRE CICLOS A ROTURA Y RELACIONES VOLUMÉTRICAS.</b>	<b>165</b>

# Lista de abreviaturas y símbolos

---

AA AM3: Arena asfalto elaborada con asfalto modificada con polímero virgen

AA CA30: Arena asfalto elaborada con CA30

AA NFU: Arena asfalto elaborada con asfalto modificado c/ alta tasa de NFU

AA: Arena Asfalto

AC (IRAM 6673): Asfaltos con inclusión de caucho molido

AC (SIGNUS): hormigón bituminoso

AM 3: Asfalto modificado con polímero virgen grado 3

AMAVC (IRAM 6673): Asfaltos modificados de alta viscosidad con inclusión de caucho

AMC (IRAM 6673): Asfaltos modificados con inclusión de caucho

BBTM: Mezcla bituminosa de granulometría discontinua

BC: Betún mejorado con Caucho

BMAVC: Betún Modificado de Alta Viscosidad con Caucho

BMC: Betún Modificado con Caucho

CA30: Cemento asfáltico clase 30

CAC D19: Concreto asfáltico en caliente tipo denso, tamaño máximo nominal de agregados 19 mm

CEDEX AM3: Curva granulométrica propuesta por el centro de estudios y experimentación de obras públicas elaborada con asfalto modificado con polímero virgen

CEDEX NFU: Curva granulométrica propuesta por el centro de estudios y experimentación de obras públicas elaborada con asfalto modificado con alta tasa de NFU

CEDEX: Centro de estudios y experimentación de obras públicas

CINTEMAC: Centro de investigación, desarrollo y transferencia de materiales y calidad

DNV: Dirección Nacional de Vialidad

DSR: Dynamic Shear Rheometer

G\*: Módulo complejo de corte

ITSR (UNE-EN 12697-12): Indirect Tensile Stress Ratio

LAS: Barrido de amplitud lineal

LEMaC: Centro de investigaciones viales

LVDT: Linear Variable Differential Transformer

MAC AM3: Microaglomerado asfáltico en caliente elaborado con asfalto modificado con polímero virgen

MAC NFU: Microaglomerado asfáltico en caliente elaborado con asfalto modificado con alta tasa de NFU

MAC: Microaglomerado asfáltico en caliente

MARF: Mezclas Asfálticas para Retardo de Fisuras

MR: Módulo de Rigidez

NFU: Neumático Fuera de Uso

PA: Mezcla bituminosa drenante

PMBC: Betún Modificado mayoritariamente con Caucho

RBV: Relación Betún Vacíos

S.A.M.: Stress Absorber Membrane

S.A.M.I.: Stress Absorber Membrane Interlayer

SIGNUS: Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso

S-VECD: Teoría Simplificada del Daño Viscoelástico Continuo

TSR (AASHTO T283): Relación del esfuerzo tensional

UTN FRC: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba

UTN FRLP: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata

UTN: Universidad Tecnológica Nacional

VAM: Vacíos del Agregado Mineral

WESLEA: Waterways Experimental Station Layered Elastic Analysis

WTT: Wheel Tracking Test

$\delta$ : Angulo de fase

Los neumáticos fuera de uso (NFU), cuando han alcanzado ese estatus, pueden ser aprovechados de varias formas, reutilizándolos, reciclando los mismos, sumados a un proceso de cogeneración de energía, o en la incorporación en el proceso de modificación de los asfaltos para la elaboración de mezclas asfálticas.

En la búsqueda de obtener ligantes con altas prestaciones elásticas, en los últimos años, se han estudiado distintos modificadores de los asfaltos. El polvo de NFU han sido uno de ellos, siendo tasas del orden del 8 % una de las experiencias realizadas por el autor de esta tesis. Con el objetivo de obtener mejoras en las propiedades mencionadas, en la presente investigación se ha estudiado una mayor incorporación de NFU. Para ello, se realizó la incorporación de cantidades crecientes del polvo de NFU, en distintos tipos de asfaltos base mediante el equipo de dispersión. La caracterización y evaluación de sus comportamientos reológicos de cada uno de ellos, permitió observar el grado de modificación y adoptar, con criterios en base a especificaciones internacionales, aquel que presentó las mejores características para la elaboración de mezclas retardantes de la fisuración refleja.

En lo que respecta a los pavimentos, las cargas repetidas de vehículos y las condiciones ambientales ejercen sollicitaciones que causan un deterioro constante en la estructura. Este desgaste conduce a la pérdida de propiedades mecánicas, lo que a su vez resulta en una disminución de la capacidad estructural y funcional de la carretera. Entre las fallas más comunes se encuentran el ahuellamiento que son deformaciones permanentes, las grietas por fatiga, las grietas térmicas y la fisuración refleja. Este último problema, que consiste en la propagación de fisuras desde capas inferiores hacia la nueva capa colocada como refuerzo, es especialmente difícil de controlar, ya que reproduce la patología de las capas anteriores.

El deterioro prematuro de los pavimentos debido a la aparición de fisuras reflejas, por rotura rápida de las capas colocadas para retardar las mismas, ocasiona reiteradas tareas de mantenimiento, generando incrementos en los

costos de conservación de estas estructuras. Las mezclas más utilizadas para dicho retraso, han sido las arenas asfalto de granulometría continua que pueden ser elaboradas con asfalto convencional, y que en muchas ocasiones han fallado de manera temprana frente a la propagación de fisuras. Se genera así, la necesidad de mejorar el desempeño de esta mezcla, para lo cual se las han elaborado a partir de asfaltos modificados. En ese sentido, en el presente estudio se ha evaluado el desempeño de la misma, a partir de una elaborada con asfalto convencional, otra fabricada con asfalto modificado con polímero virgen y otra, con el mencionado antes, con alta incorporación de NFU. Este tipo de mezclas han presentado algunas dificultades y es por ello que, en la búsqueda de alternativas, se evalúan otras con granulometría discontinua y que deben ser elaboradas con asfalto modificado. Estas presentan un menor ahuellamiento y poseen una mayor proporción de vacíos, capaces de albergar al NFU. Estos espacios ocupados parcialmente por el mastic, formado por los finos y el ligante modificado con NFU, generan un medio que dificulta el crecimiento de la fisura. En esa línea, se plantea un estudio de mezclas de discontinuidad creciente. Por ello, se evaluaron un microconcreto discontinuo en caliente y otra con una mayor discontinuidad granulométrica. Estas también fueron elaboradas con los mismos asfaltos anteriores, el modificado con polímero virgen y con alta tasa de NFU. La valoración de la capacidad de disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras, se ha realizado en probetas ensayadas con la metodología del modelo de reflejo de fisuras, con equipo de cargas cíclicas LEMaC. La determinación se ha realizado en probetas rectangulares fabricada con cada una de estas mezclas mencionadas, en un modelo que considere las capas intervinientes en una tarea de rehabilitación, siendo esto una capa inferior fisurada, una intermedia retardante de la fisura y una superficial de refuerzo. Por último, se presentan las conclusiones extraídas donde se ha observado que una mezcla hasta una determinada discontinuidad granulométrica, presenta un buen desempeño frente a la propagación de la fisura. Además, esto último ha podido relacionarse con algunas de las características reológicas determinadas en el ligante con alta tasa de NFU.

Palabras claves: asfalto – polvo de NFU – mezclas asfálticas retardo de fisura

Waste tires, when they reach that status, can be utilized in various ways, including reuse, recycling, incorporation into energy co-generation processes, or as modifiers in the asphalt modification process for the production of asphalt mixtures.

In the pursuit of obtaining binders with high elastic performance, different asphalt modifiers have been studied in recent years. Waste tire powder has been one of them, with rates of around 8 % being one of the experiences conducted by the author of this thesis. In order to achieve improvements in the mentioned properties, the present research has investigated a higher incorporation of waste tire powder. For this purpose, increasing amounts of waste tire powder were incorporated into different types of base asphalts using a dispersion equipment. The characterization and evaluation of their rheological behaviors allowed observing the degree of modification and selecting, based on international specifications, the one that exhibited the best characteristics for the production of crack-retarding asphalt mixtures.

Regarding pavements, repeated vehicle loads and environmental conditions exert stresses that cause constant deterioration in the structure. This wear leads to the loss of mechanical properties, resulting in a decrease in the structural and functional capacity of the road. Common failures include permanent deformations known as rutting, fatigue cracks, thermal cracks, and reflective cracking. The latter problem, involving the propagation of cracks from lower layers to the new layer placed as reinforcement, is particularly difficult to control as it reproduces the pathology of the previous layers.

The premature deterioration of pavements due to the appearance of reflective cracks, resulting from the rapid failure of layers placed to delay them, leads to repeated maintenance tasks, generating increases in the conservation costs of these structures. The most commonly used mixtures for this delay have been continuous granulometry asphalt sands, which can be produced with conventional asphalt and often fail early against crack propagation. This creates the need to improve the performance of this mixture, for which they have been made with modified asphalts. In this study, the performance of a mixture made with

conventional asphalt, another with asphalt modified with virgin polymer, and another with the previously mentioned high incorporation of waste tire powder was evaluated. These mixtures have presented some difficulties, prompting the evaluation of alternatives with discontinuous gradation that must be made with modified asphalt. These mixtures have less rutting and a higher proportion of voids capable of accommodating waste tire powder. These spaces, partially occupied by the mastics formed by the fines and the binder modified with waste tire powder, create an environment that hinders crack growth. In this regard, a study of mixtures with increasing discontinuity is proposed. Therefore, a discontinuous hot microconcrete and another with higher granulometric discontinuity were evaluated. These were also made with the same previous asphalts, the one modified with virgin polymer and with a high rate of waste tire powder. The assessment of the ability to slow down crack propagation was carried out on specimens tested with the crack reflection model methodology, using the LEMaC cyclic load equipment. The determination was made on rectangular specimens manufactured with each of these mentioned mixtures, in a model that considers the layers involved in a rehabilitation task, including a cracked lower layer, a crack-retarding intermediate layer, and a reinforcing surface layer. Finally, the extracted conclusions are presented, where it has been observed that a mixture up to a certain granulometric discontinuity performs well against crack propagation. Moreover, this has been correlated with some of the rheological characteristics determined in the binder with a high rate of waste tire powder.

Keywords: asphalt - NFU dust - asphalt mixtures crack retardation

# Capítulo 01: Introducción

---

## RESUMEN

En este capítulo se presenta una introducción de la problemática abordada, en cuanto a los neumáticos fuera de uso (NFU) y a los deterioros prematuros de las tareas de rehabilitación, en pavimentos, por el fenómeno de la fisuración refleja. Asimismo, los antecedentes en cuanto a la elaboración de mezclas con asfaltos con polvo de NFU y con mayores cantidades éste, y su posible aplicación en capas que retarden la reflexión de fisuras. Luego para abordar dicha problemática cual ha sido el objetivo planteado y un resumen de la metodología seguida en esta tesis.

## 1.1 Problemática

El neumático, una vez que llega a agotar su vida útil, su caucho se puede reciclar para diferentes usos, como pueden ser elementos cortados directamente del mismo, energía en hornos de cemento o también como adición en el proceso de modificación de los asfaltos para la elaboración de mezclas asfálticas. Este elastómero no es virgen, habiendo experimentado un cambio en su respuesta frente a estados de sollicitación con deformaciones menos flexibles. Algunas toneladas son utilizadas en algunos de los usos antes mencionados, pero también se depositan en naves y espacios abiertos a la espera de un tratamiento que no siempre llega. Esta acumulación da lugar a la aparición de roedores e insectos como mosquitos e incendios de difícil control. Por otro lado, si estos neumáticos tienen como destino final su disposición en vertederos, trae inconvenientes por su forma y composición, ya que no pueden ser fácilmente compactados, ni se descomponen y, por lo tanto, consumen más cantidades considerables de espacio en los vertederos. (Lund, 1996).

En un país, es de gran importancia contar con adecuadas infraestructuras viales para su desarrollo como de sus economías regionales (Giovanon et al., 2008). La superficie por la que transitan los vehículos debe ofrecer una experiencia de conducción cómoda y segura para los usuarios. Una vez construida, comienza su fase operativa, en la cual se llevan a cabo dos categorías de actividades, aquellas destinadas a brindar un servicio eficiente en la vía, y otras orientadas a mantener

y rehabilitar la propia infraestructura. Mientras que las primeras se relacionan con la información proporcionada a los usuarios y su utilización, las segundas engloban intervenciones físicas cuyo propósito es restaurar las condiciones originales de la vía, ya que las capas superficiales sufren deterioros debido a la combinación del tránsito y las condiciones climáticas (Martínez Echevarría, 2012).

En este sentido se puede mencionar que los pavimentos asfálticos, presentan distintos tipos de fallas, que afectan a la calidad y las propiedades de sus materiales. Las más frecuentes son las de deformaciones permanentes o ahuellamiento, el agrietamiento por fatiga, el agrietamiento térmico y la fisuración refleja.

La fisuración refleja se puede definir como la discontinuidad que aparece en la capa asfáltica dispuesta como refuerzo en un pavimento existente, es decir que resulta de una prolongación ascendente de la fisura que presenta la capa inferior y que puede no corresponder a fallas del paquete estructural (Rodríguez et al., 1989). Estas constituyen no sólo un problema estético sino fundamentalmente una vía posible para la entrada del agua hacia las capas inferiores del pavimento, ocasionando degradaciones que afectan la regularidad superficial y por lo tanto la comodidad y la seguridad en el tránsito. También es importante mencionar que esencialmente generan una disminución en la capacidad portante de las capas inferiores, sub-base y sub-rasante, disminuyendo de esta manera notablemente la vida en servicio del camino (Francesio, 2001).

Una fisura subyacente a la capa asfáltica puede actuar de dos formas independientes para provocar su reflexión. Una de ellas es cuando se verifica roce entre la capa de refuerzo y el pavimento existente, lo cual genera a baja temperatura una concentración de tensiones en la región de la extremidad de la fisura que provoca a su vez la abertura de una nueva fisura en la capa de refuerzo.

El deterioro prematuro de los pavimentos debido a la aparición de fisuras reflejas, por rotura rápida de las capas colocadas para tal fin, ocasiona reiteradas tareas de mantenimiento en las carpetas de rehabilitación colocadas sobre ellas, generando incrementos en los costos de conservación de estas estructuras. En búsqueda de mejorar esta situación, algunas técnicas han sido colocar geogrilas y geosintéticos en dichas capas. Asimismo, las mezclas asfálticas más utilizadas para esto, han sido las arenas-asfalto (AA) de granulometría continua y que

pueden ser elaboradas con asfalto convencional. Además, permitían corregir deterioros superficiales, restituir gálibos, entre otros; pero en reiteradas ocasiones han fallado de manera temprana frente a la propagación de fisuras. Se genera así la necesidad de mejorar el desempeño de esta mezcla, para lo cual en la presente investigación se las ha estudiado a partir de elaborarlas con asfaltos modificados con altas tasas de polvo de NFU. En esta mezcla, se podrían presentar algunos inconvenientes, y esto motivó la búsqueda de alternativas, para lo cual se valoró el desempeño frente a la propagación de fisuras de otros tipos de mezclas fabricadas con el mismo asfalto.

Por todo lo anterior se puede mencionar que el ámbito de estudio se centra en la restauración de carreteras mediante la aplicación de capas asfálticas en caliente, considerando su elaboración a partir de un asfalto con una elevada cantidad de NFU. Este proceso de restauración, forma parte de las estrategias de preservación y cuidado de las vías, implementadas por organismos gubernamentales a nivel nacional, provincial o local, en sus sistemas de transporte tanto urbanos como rurales. También puede ser llevado a cabo por entidades privadas, aplicando estas técnicas en redes viales de parques industriales, áreas portuarias, lugares de carga y descarga, estaciones de transporte, entre otros ejemplos.

## **1.2 Antecedentes**

La generación de neumáticos desechados en el mundo sigue creciendo y en Argentina, una gran cantidad son desechados y arrojados a vertederos sin ningún tipo de tratamiento. Estos son residuos sólidos de mucho volumen en relación a su peso, difíciles de compactar y de baja degradabilidad.

Se hace necesario en Argentina, estudiar estrategias tecnológicas de inclusión de caucho en asfaltos para distintos usos viales, que por su volumen permitan adicionar cantidades significativas en relación a la producción de residuos de neumáticos desechados.

Es por esto que, en la búsqueda de obtener asfaltos con altas prestaciones elásticas, en los últimos años, se ha estudiado la incorporación del polvo de NFU, siendo tasas del orden del 8 % las experiencias realizadas en Argentina (Segura et al., 2018). Con el objetivo de obtener mejoras en las propiedades mencionadas, en la presente investigación se ha estudiado una mayor incorporación de NFU y

su aplicación en mezclas retardantes de la fisuración refleja.

La guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático (SIGNUS, 2017), especifica tres tipos de betunes asfálticos modificados con caucho, cuando se realiza la incorporación por vía húmeda: (BC) betún mejorado con caucho (8 al 12 % de polvo de NFU), (BMC) betún modificado con caucho (12 al 15 % de polvo de NFU) y (BMAVC) betún modificado de alta viscosidad con caucho (15 al 22 % de polvo de NFU).

En Latinoamérica las mayores experiencias se encuentran en algunos estados de Brasil y en Colombia. En Argentina se pueden mencionar que las experiencias de incorporación de NFU realizadas, son las siguientes: mezcla asfáltica densa en dos tramos, una en calle 60 y otra en calle 19 en la ciudad de La Plata, ambas incorporado por vía húmeda, tramos en autopista AUSA en Buenos Aires, con incorporación por vía húmeda y seca y en selladores asfálticos elaborado con NFU.

En la rehabilitación de pavimentos agrietados, es común aplicar una capa de mezcla asfáltica en caliente de cierto espesor y características de superficie, después de limpiar y reparar las fisuras existentes. Sin embargo, esta solución puede no resultar duradera debido a que las tensiones continúan afectando los bordes de las fisuras, lo que lleva a su propagación hacia la superficie de manera rápida.

En las últimas décadas, se ha llevado a cabo una serie de investigaciones para abordar este problema, con el objetivo de controlar o retardar este proceso a través de enfoques reconocidos internacionalmente, como el S.A.M. (Stress Absorber Membrane), que implica la aplicación de una capa especial que actúa como capa de rodadura, o el S.A.M.I. (Stress Absorber Membrane Interlayer) (Al-Qadi et al., 2004), que involucra la inserción de una capa intermedia con características particulares entre el pavimento existente y la nueva capa de refuerzo. Esta capa intermedia tiene la función de absorber y distribuir las tensiones, evitando o retrasando la propagación de las grietas y contribuyendo a una solución más duradera en la rehabilitación de pavimentos.

En la actualidad, resulta complicado determinar con precisión la eficacia relativa de diversos sistemas en mayor o menor medida. Esta dificultad se origina principalmente en la diversidad de casos de fisuración, que se presenta de manera

sumamente compleja, influenciada por sus causas y su evolución, así como por factores externos como el volumen de tránsito, las condiciones ambientales y las propiedades de los materiales que componen los pavimentos.

Por otro lado, Delbono (2014), ha trabajado en la determinación de la respuesta de diferentes tipos de sistemas retardadores de la fisuración refleja considerando pavimentos rígidos y flexibles, e interponiendo entre ellos distintos tipos de geosintéticos a partir de un modelo de sollicitación, adaptando el equipo de módulo dinámico disponible. Asimismo, el estudio de diferentes mezclas asfálticas con el fin de retrasar la propagación de fisuras en pavimentos, elaboradas con asfalto altamente modificado con NFU, no han sido evaluadas.

### **1.3 Justificación**

Una disminución de la susceptibilidad térmica de los asfaltos, en las temperaturas de servicio, o sea provocar que el asfalto registre menores cambios de consistencia con los cambios de temperatura es la tendencia en la tecnología de las mezclas asfálticas actuales.

Se hace necesario para ello incorporar adiciones al ligante asfáltico y las principales adiciones son los polímeros elastoméricos, los cuales se microdispersan en el ligante asfáltico mediante la aplicación de temperaturas y un fuerte esfuerzo de corte. Existen dos tipos de adiciones poliméricas, según sea su origen: adición de polímeros vírgenes, adición de polímeros reciclados. Los primeros más utilizados son copolímeros en bloc, tales como el estireno butadieno estireno, el estireno butadieno, el estireno butadieno rubber, el etil vinil acetato, entre otros (Bergareche, 2004).

La mayoría de los polímeros son importados y esta realidad hace que el costo de los polímeros sea elevado, dado su origen, el crudo de petróleo, y su moneda de comercialización, el dólar. Sin embargo, a pesar de ello, se han instalado las mezclas de altas prestaciones como una necesidad para la seguridad vial (Botasso, 2018).

La posibilidad de aprovechar un polímero desechado, surge como una necesidad de disminuir costos en la fabricación de asfaltos modificados y utilizar un residuo como son los neumáticos que presentan un complejo tratamiento para

su disposición final. Por otro lado, la elevada viscosidad de los asfaltos con alto contenido de polvo de NFU, facilita elaborar mezclas con contenidos de asfaltos mayores a los normalmente utilizados. Esto junto con el mejor desempeño de su comportamiento reológico, permite utilizarlo en mezclas cuya aplicación requieran una mayor resistencia a fatiga y durabilidad al ser sometidas a ciclos de repeticiones de carga (Gallego, 2004).

Guoqing Wang y otros (2020) realizaron la incorporación en un asfalto base de porcentajes crecientes de polvo de NFU (20 %, 25 %, 30 %, 35 %, 40 %, 45 % y 50 %) y sus caracterizaciones mediante ensayos convencionales y reológicos. Los resultados obtenidos muestran que la adición de polvo de caucho puede mejorar eficazmente el rendimiento al ahuellamiento a altas temperaturas. Además, que aquellos de más alto contenido de NFU, tiene notables propiedades antienviejimiento y resistencia a la fatiga.

Xiaofeng Wang y otros (2022) incorporaron en un asfalto base polvo de NFU en tres porcentajes (15 %, 20 % y 25 %). Posteriormente mediante mediciones reológicas, encontraron que dicha incorporación mejora el módulo de corte complejo y reduce el ángulo de fase del asfalto. También que mejora significativamente la rigidez, el módulo, la energía cohesiva y las propiedades elásticas a alta temperatura del asfalto.

El mantenimiento y la conservación de los pavimentos es innegable que tienen un papel fundamental, al asegurar la protección de la inversión inicial en la construcción. Además de reducir los costos operativos, esta práctica extiende la vida útil tanto de la vía como de los vehículos que la transitan (Davies et al., 2000). El mantenimiento vial, más allá de ser simplemente una medida económica, es una solución altamente técnica que requiere enfoque ingenieril. Por lo tanto, estos trabajos deben llevarse a cabo de manera oportuna, ya que esto juega un papel determinante en la minimización de los gastos a largo plazo.

Las fisuras pueden tener un impacto no sólo en la estética de una estructura, sino también en casos más graves, estar relacionadas con problemas estructurales importantes. En esta perspectiva, la reflexión de fisuras emerge como uno de los temas más prominentes para las entidades encargadas de las vías de tránsito y representa una preocupación primordial en el campo de la ingeniería de pavimentos en la actualidad (Elsefi et al., 2003).

En mezclas asfáltica para retardo de fisuras reflejas, la acción combinada del tránsito y del clima lleva a los revestimientos de pavimentos asfálticos a que tarde o temprano la rehabilitación se fisure. Una vez que se produce la falla, la misma se propaga y aumenta en extensión, severidad e intensidad, llevando eventualmente a la disgregación del revestimiento. Por medio de esos efectos, la velocidad de deterioro del pavimento se encuentra usualmente acelerada después del inicio de la fisuración.

La secuencia para la ocurrencia de la rotura por fatiga de una capa asfáltica se inicia con la unión de micro fisuras inherentes a la mezcla asfáltica, que por un proceso continuo de propagación originan las macro fisuras. Posteriormente, se tiene el crecimiento de la fisura en un plano perpendicular al de la dirección de la tensión principal de tracción; esto ocurre cuando la tensión en la extremidad de la fisura sobrepasa la tensión cohesiva teórica del material. La tercera y última fase se caracteriza por la fractura final, donde la fisura alcanza un tamaño crítico que imposibilita su crecimiento de forma estable atravesando todo el espesor de la capa asfáltica. Así, el aumento del espesor de la capa redundará en un incremento de la vida de servicio, para igual deformación de tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica, en razón de que el espesor que debe atravesar la fisura es mayor, requiriendo un número adicional de ciclos de carga.

La aplicación de sistemas de interfase tiene en principio por objeto interponerse entre la nueva capa de recapado y el pavimento fisurado, pretendiendo que la misma produzca absorber tensiones, bloqueo de desplazamientos, desacoplamiento térmico, desvío de fisuras, entre otros.

Se designan como sistemas de membrana absorbente de tensiones a toda configuración de capa que permita, absorber los esfuerzos mecánicos combinados que se concentran en las fisuras y grietas de pavimentos existentes deteriorados que se desean rehabilitar.

Las S.A.M.I. actúan re-direccionando localmente las fisuras ascendentes del pavimento envejecido y permiten absorber parte de la energía de propagación. Por otro lado, la valoración de la propagación de las fisuras se realiza con modelos desarrollados que determinan en forma comparativa las bondades de un sistema S.A.M.I. En primera instancia, los modelos de laboratorio utilizados en la propagación de fisuras se caracterizan por poseer sollicitaciones dinámicas donde

la aplicación de carga se repite con cierta frecuencia a lo largo de un número determinado de ciclos, es decir que se genera de esta manera una sollicitación repetida (Delbono, 2014).

En la bibliografía Gallego (2004), CEDEX (2007) y SIGNUS (2017), mencionan que las mezclas elaboradas con asfalto con alto contenido de NFU, se dosifican con un porcentaje mayores de este tipo de ligante. Esto es debido a la alta viscosidad que presenta el asfalto al incorporar un porcentaje elevado de NFU. También, que la resistencia a fatiga de estas mezclas es elevada, dotándolas de una mayor duración en las repeticiones de ciclos de carga. Asimismo, las principales aplicaciones que hacen referencia, es cuando se prevén problemas de fisuración refleja desde las capas inferiores y cuando se deseen capas de rodaduras durables.

En mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos con polvo de NFU, Botasso (2018) en Latinoamérica y Gallego (2004) en Europa, son referentes y sus trabajos han sido en ese sentido desde la referencia hasta la actualidad, importantes aportes en los desarrollos de técnicas y valoraciones en dichas mezclas.

Rui Pan y otros (2020) elaboraron mezclas con diferentes granulometrías continuas realizadas con distintos asfaltos. Estos últimos fueron, uno con un 22 % polvo de NFU, otro con el mismo porcentaje de NFU y con dos diferentes aditivos y por último uno con polímero SBS. Las mezclas fueron evaluadas a la capacidad de resistir a la tracción a bajas temperaturas, de 20 °C a -30 °C. Se encontró que las con NFU tienen mejor rendimiento y más aún aquellas que utilizaron el aditivo, respecto a la mezcla con SBS.

Ping Li y otros (2023) estudiaron la resistencia al agrietamiento de diferentes mezclas asfálticas utilizadas como membranas para absorber la propagación de fisuras. Para ello, plantearon la elaboración de diferentes mezclas con granulometrías distintas, desde continuas a discontinuas, elaboradas con asfalto con un 20 % de polvo de NFU. Encontraron una significativa influencia en el desempeño de las mezclas al agrietamiento al variar la granulometría. En aquellas donde se presentaba una estructura más fina se redujo la resistencia a la expansión de la grieta y aceleraba la falla, y sucedía lo contrario con un aumento en el contenido de agregado grueso.

En síntesis, una mezcla para retardo de fisura deberá ser capaz de disipar las tensiones generadas deformándose y admitiendo una mayor cantidad de ciclos de carga hasta la rotura sin perjudicar otras características. En la presente investigación, para estudiar esto, se han evaluado el desempeño de diferentes mezclas asfálticas elaboradas con un mayor porcentaje de NFU en el ligante asfáltico y creciente discontinuidad granulométrica. Esto es para, además de dotar al ligante base de mejores características al igual que la mezcla, también lograr una mayor utilización de NFU.

## **1.4 Hipótesis**

Las mezclas asfálticas, utilizadas para retardo de la fisuración refleja, serán más efectivas en la medida que admitan mayor tasa de polvo de NFU en su formulación. Para ello, las mismas deberán diseñarse con mayor discontinuidad granular y mayor tasa de ligante asfáltico, considerando como base de referencia las mezclas tipo arena asfalto de la vialidad convencional.

## **1.5 Objetivo de la tesis**

Estudiar la respuesta bajo sollicitación dinámica de mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja, elaboradas con asfaltos fuertemente modificado con polvo de NFU y su comparación con sistemas convencionales.

## **1.6 Objetivos Específicos**

- Valorar la reología de los asfaltos fuertemente modificados con polvo de NFU.
- Analizar el comportamiento de diferentes sistemas retardantes de la fisuración refleja, a partir del diseño de mezclas asfálticas de rehabilitación.
- Realizar propuesta de marco normativo en Argentina para mezclas asfálticas elaboradas con fuerte modificación con polvo de NFU.

## **1.7 Metodología de la investigación**

El logro del objetivo propuesto se realiza en una primera etapa a través de la revisión bibliográfica respecto a materiales, mezclas con alta tasa de NFU, fenómenos de reflejo de fisuras y técnicas de capas de retardo de las mismas.

Luego se evaluará la velocidad de propagación de la fisura mediante la aplicación de cargas dinámicas en un modelo que consta de tres capas. En la parte inferior, una que posee la fisura, la intermedia que es la que está en estudio y una superior. En dicho modelo, la del medio es la que se va variando. Por ello, como capa intermedia se evaluaron, una arena asfalto elaborada con CA30 (AA CA30), otra con NFU (AA NFU), otra con polímero virgen AM 3 (AA AM3), un Microaglomerados Asfálticos en Caliente Tipo F10 (MAC) (DNV, 2017), uno elaborado con NFU (MAC NFU) y otro con polímero virgen (MAC AM3). También, avanzando en una mayor discontinuidad, otra propuesta por el Centro de estudios y experimentación de obras públicas de España (CEDEX, 2007), una elaborada con NFU (CEDEX NFU) y otra con polímero virgen (CEDEX AM3). Asimismo, teniendo en cuenta la diversidad de modelos consultados en la bibliografía, el antecedente de Delbono (2014), generando las condiciones base de aplicación de la metodología, y utilizando la tecnología disponible para llevar adelante esta tesis, se considera efectivo el procedimiento adoptado de evaluación de progreso de la fisura, siendo este compuesto por el modelo de probeta, el sistema de apoyo y el de aplicación de carga. Además, se ha estudiado la respuesta frente a la fisuración refleja de nuevas propuestas tecnológicas de mezclas asfálticas, utilizando un ligante modificado con una alta tasa de polvo de NFU, obteniendo una comparación relativa entre ellas. Por todo ello, la valoración ha sido considerada desde un punto de vista tecnológico, no siendo objeto de la tesis la elaboración de un sistema o metodología de valoración de la aptitud de las mezclas, mediante un procedimiento de determinación indirecto de la propagación de la fisura como un estudio analítico de modelización. También se puede mencionar que mediciones de apertura de fisura mediante elementos que registren deformaciones, para relacionarlos con una determinación indirecta del crecimiento de la fisura, no se encuentran dentro del alcance de esta tesis.

## 1.8 Referencias

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.

Bergareche, E. (2004). Optimización de la composición y procesado de betunes modificados con polímeros reciclados. Universidad del País Vasco. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).

Botasso, G. (2018). Dispersiones de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso. Su empleo en mezclas asfálticas densas y antiderrapantes. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-87-5. pp 268.

CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España. Madrid, España. ISBN: 978-84-7790-450-2. pp 63.

Davies, M., Sorensom Jim (2000). Insights into Pavement preservation. Federal Highway Administration. Washintong DC. 26 p

Delbono, L. (2014). Estudio de grillas poliméricas en sistemas anti-reflejo de fisuras bajo solicitaciones dinámicas. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-38-7. pp 414.

Dirección Nacional de Vialidad, DNV (2017). Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F (2017). Argentina.

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.

Francesio, A. (2001). El control de la fisuración refleja. XI CILA – Congreso Iberoamericano del asfalto. Lima, Perú.

Gallego, J. (2004). Tipos de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencia española en la conservación de carreteras. Universidad politécnica de Madrid.

Giovanon, O., Bueno, F. (2008) "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina.

Guoqing Wang, Xinqiang Wang, Songtao Lv, Lusheng Qin, Xinghai Peng (2020). Laboratory Investigation of Rubberized Asphalt Using High-Content Rubber Powder. *Journals Materials*. Vol. 13. N° 19. ISSN 1996-1944. pp 19.

Lund, H.F. (1996). *Manual Mc Graw-Hill de Reciclaje Vol. I*. Interamericana. Madrid, España. ISBN 84-481-0728-4.

Martínez Echevarria, M.J. (2012). "Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España.

Ping Li, Xuan Xiao, Shuaituan Tian, Junbin Liu, Wenju Peng, Bin Wang 6 and Shende Liu (2023). Gradation Influence on Crack Resistance of Stress-Absorbing Membrane Interlayer. *Journals Applied Sciences*. Vol. 13. N° 20. ISSN 2076-3417. pp 24.

Rodríguez, R., Montestruque, G. (1989). Implementación computacional de un modelo para la previsión de la propagación de fisuras en recapados asfálticos. Tomo 1. Congreso: C.P.A. (Comisión Permanente del Asfalto). S. Pablo, Brasil.

Rui Pan, Yiming Li (2020). Effect of warm mix rubber modified asphalt mixture as stress absorbing layer on anti-crack performance in cold región. *Journals Construction and Building Materials*. Vol. 251. ISSN 1879-0526. pp 8.

Segura, A., Positieri, M., Botasso, G. (2018). Libro: Utilización de asfalto modificado con NFU. Elaboración de un microconcreto discontinuo en caliente. Volumen I. Publicia. London, United Kingdom. ISBN: 978-620-2-43179-8. pp 286.

SIGNUS (2017). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso. Madrid, España. ISBN 13 978-84-616-9263-7. pp 35.

Xiaofeng Wang, Jianan Liu, Zhenjun Wang, Haosen Jing, Bo Yang (2022). Investigations on Adhesion Characteristics between High-Content Rubberized Asphalt and Aggregates. *Journals Polymers*, Vol. 14. N° 24. ISSN 2073-4360. pp 18.

# Capítulo 02: Neumáticos fuera de uso sus características y la caracterización del polvo de ellos utilizado

---

## RESUMEN

El presente capítulo se presenta una descripción de los diferentes cauchos naturales, sintéticos y de este último cual es el más utilizado en la fabricación de neumáticos y sus propiedades. Luego los neumáticos su importancia, composición, partes, el mercado, generación y tendencia de trituración en Argentina de los neumáticos fuera de uso (NFU). También los efectos, como residuos, que ocasiona en el ambiente y algunas técnicas de revalorización. Por último, el triturado de NFU que se ha utilizado en esta investigación, aportado por una empresa, del cual se muestran sus ensayos físicos de caracterización como su granulometría y densidades.

## 2.1 El caucho

El caucho es una sustancia natural o sintética que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica. El natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en numerosas plantas (Tropac, 2001). También puede ser caucho sintético que se prepara a partir de hidrocarburos insaturados (Engineering Plastics, 1999).

### 2.1.1. Caucho natural

En su estado natural, el caucho se encuentra en forma de una suspensión coloidal presente en el látex de plantas productoras de caucho. Uno de estos ejemplos es el árbol *Hevea Brasiliensis*, que pertenece a la familia de las Euforbiáceas y es originario de la región amazónica. Otro árbol productor de caucho es el *Castilloa elástica*, conocido como el árbol del hule, el cual es nativo de México y ha sido ampliamente utilizado desde tiempos prehispánicos para la fabricación de pelotas. Sin embargo, debido a eventos de piratería llevados a cabo por los británicos, se comenzaron a establecer plantaciones de estas especies en diferentes regiones, incluyendo Indonesia, Malasia, Tailandia, China y la India.

Estas áreas son responsables en la actualidad de la producción de aproximadamente el 90 % del caucho natural a nivel mundial.

La expansión de las áreas destinadas al cultivo del caucho alcanzó su punto máximo en los años inmediatamente anteriores a la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). En las colonias británicas de la India, Malasia y el archipiélago Malayo, las plantaciones llegaron a abarcar alrededor de 1820000 hectáreas. En las Indias Orientales, bajo el dominio holandés (hoy Indonesia), se sumó una extensión de cultivo de 1420000 hectáreas, completando así un total mundial de 3640000 hectáreas, antes de la gran devastación de los cultivos en el Lejano Oriente durante la Segunda Guerra Mundial (Friedenthal, 2004).

Durante la Segunda Guerra Mundial, quedó en claro la significativa importancia política y económica del caucho natural cuando su suministro se agotó. Este acontecimiento aceleró la investigación y desarrollo del caucho sintético en diversas naciones. Para el año 1990, la producción global de caucho superó la marca de 15 millones de toneladas métricas, de las cuales 10 millones correspondieron al caucho sintético (Tropac, 2001).

En 1834, el químico alemán Friedrich Ludersdorf y el químico estadounidense Nathaniel Hayward hicieron un descubrimiento importante: al agregar azufre a la goma de caucho, se lograba reducir y eliminar la pegajosidad presente en los objetos fabricados con dicho material. Posteriormente, en 1839, el inventor estadounidense Charles Goodyear llevó este avance un paso adelante, aprovechando las investigaciones previas de los químicos. Goodyear descubrió que, al calentar caucho junto con azufre, se eliminaban las propiedades indeseables del caucho en un proceso que bautizó como "vulcanización". Como resultado de ésta, el caucho adquiría una mayor tenacidad, elasticidad y una mayor resistencia a las variaciones de temperatura en comparación con el caucho sin vulcanizar. Además, el caucho vulcanizado se volvía impermeable a los gases y presentaba resistencia frente a la abrasión, la acción de sustancias químicas dañinas, el calor y la electricidad. También demostraba tener un coeficiente de fricción elevado en superficies secas y uno más bajo en superficies mojadas por agua (Shackelford, 2002).

En la mayoría de los casos, el caucho en su forma bruta se combina con aditivos. Se emplean ciertas sustancias adicionales para conferirle mayor

elongación sin necesidad de endurecerlo, como ocurre con el carbonato de calcio y el sulfato de bario, también conocido como barita. Otros aditivos refuerzan el material para conferirle una mayor dureza "shore" en el producto final, tales como el negro de humo, el óxido de zinc, el carbonato de magnesio y ciertos tipos de arcillas. Además de esto, se incorporan pigmentos como el óxido de zinc, el litopón y diversos tintes orgánicos para fines de coloración. Asimismo, se utilizan ablandadores en los casos en que el caucho sea demasiado rígido para mezclarse adecuadamente. Estos ablandadores pueden ser derivados del petróleo, como aceites y ceras, así como la brea de pino y ácidos grasos. Este proceso de adición de aditivos al caucho se lleva a cabo con el propósito de modificar y mejorar sus propiedades según el uso previsto (Smith, 2001).

No obstante, el agente vulcanizante primario continúa siendo el azufre. Aunque el selenio y el telurio también se utilizan, su empleo suele ser en combinación con una proporción sustancial de azufre. Durante la fase de calentamiento en el proceso de vulcanización, el azufre se mezcla junto al caucho y los demás aditivos. Inicialmente, los aceleradores de la vulcanización eran limitados a óxidos metálicos como el blanco de plomo y la cal. Posteriormente, se introdujeron una amplia gama de aminas orgánicas como aceleradores en el proceso (Eldin et al., 1993).

### **2.1.2. Caucho sintético**

El término "caucho sintético" abarca cualquier sustancia artificial que exhiba similitudes con el caucho natural. Su producción implica procesos químicos, como la condensación o la polimerización, que parten de hidrocarburos insaturados específicos. Los componentes fundamentales del caucho sintético, denominados monómeros, tienen una masa molecular relativamente baja y se unen para formar moléculas de gran tamaño llamadas polímeros. Una vez fabricado, el caucho sintético también es sometido al proceso de vulcanización para mejorar sus propiedades (Seymour et al., 1995).

La génesis de la tecnología del caucho sintético puede remontarse a 1860, cuando el químico británico Charles Hanson Greville Williams identificó que el caucho natural estaba compuesto por un polímero del monómero isopreno. Durante las siete décadas posteriores, se emprendieron investigaciones en laboratorios para lograr la síntesis del caucho utilizando el isopreno como

monómero central. Además, se exploraron otros monómeros en este proceso. Fue durante la Primera Guerra Mundial cuando científicos alemanes lograron polimerizar dimetilbutadieno, resultando en la creación de un tipo de caucho denominado caucho de metilo, aunque con aplicaciones limitadas.

Wallace Hume Carothers, químico estadounidense, y su homólogo alemán Hermann Staudinger, marcaron un hito en 1930 al investigar y contribuir al descubrimiento de los polímeros como moléculas gigantes, en cadena, compuestas de un gran número de monómeros. No sería sino hasta este punto que se lograría sintetizar caucho utilizando monómeros distintos al isopreno. A lo largo de la Segunda Guerra Mundial, la investigación llevada a cabo en Estados Unidos culminó en la síntesis de un polímero de isopreno con una composición química completamente equiparable a la del caucho natural (Tropac, 2001).

### **Tipos de caucho sintético**

Los diferentes tipos de cauchos sintéticos son el neopreno, buna, caucho de butilo y otros cauchos especiales.

#### **Neopreno**

Los primeros cauchos sintéticos en parecer fue el neopreno, un polímero derivado del monómero cloropreno. El proceso de obtención del cloropreno involucra materias primas como el etino y el ácido clorhídrico. Introducido en 1931, el neopreno se destaca por su capacidad de resistir altas temperaturas y productos químicos, incluyendo aceites y petróleo. Esta característica lo convierte en un material valioso en aplicaciones como tuberías para el transporte de petróleo y como aislante en cables y maquinaria (Zehev et al., 2006).

#### **Buna o caucho artificial**

En 1935, se produjo un hito significativo cuando químicos alemanes sintetizaron el primer miembro de una serie de cauchos sintéticos denominados Buna. Estos cauchos se obtuvieron mediante el proceso de copolimerización, que involucra la unión de dos tipos diferentes de monómeros, también conocidos como comonómeros (Baumann et al., 2000).

## **Caucho de butilo**

Fue en 1949 cuando se introdujo por primera vez este tipo de caucho sintético, el cual se obtiene mediante la copolimerización de isobutileno con butadieno o isopreno. Este material posee características plásticas y puede ser moldeado de manera similar al caucho natural, aunque presenta dificultades en el proceso de vulcanización. Aunque su flexibilidad no iguala a la del caucho natural u otros tipos sintéticos, su resistencia a la oxidación y a la corrosión es notable. Gracias a su baja permeabilidad a los gases, se emplea en los tubos interiores de los neumáticos de automóviles (Friedenthal, 2004).

## **Caucho SBR**

El caucho estireno butadieno, comúnmente conocido como SBR, se caracteriza por ser un copolímero formado a través de la polimerización de una mezcla de dos o más monómeros: el estireno y el 1,3-butadieno. Este tipo de caucho sintético ostenta el título de ser el más ampliamente utilizado en todo el mundo.

La industria de los neumáticos lidera la demanda del SBR, siendo responsable de consumir el 75 % de la producción global de este material. En segundo y tercer lugar se encuentran los sectores del calzado y la construcción respectivamente. Además, el SBR se emplea en diversas modificaciones de polímeros y en la fabricación de adhesivos. Su versatilidad se manifiesta en la creación de juntas, correas, mangueras, tacos de goma para pedales de freno y embrague, esteras, enmarcado de suelos y ventanas, compuestos para calafateo, baldosas, esponjas, suelas de calzado, y una variedad de otros usos. La demanda del SBR es influenciada por factores como el sector de los usuarios finales, las fluctuaciones de precios y la competencia a nivel global y regional (Botasso, 2018).

En el espectro de variantes significativas se encuentran (Friedenthal, 2004):

- Copolímero estadístico de estireno/butadieno (SBR): Ampliamente empleado en cubiertas de vehículos livianos, ya sea en estado puro o mezclado con goma natural.
- Polibutadieno: Confiriendo una notable resistencia a la abrasión en neumáticos, así como excelente durabilidad en bajas temperaturas (entre las mejores de las gomas de uso diverso), pero demostrando menor

adherencia en superficies húmedas, lo cual puede dar lugar a deslizamientos. Por esta razón, suele combinarse con SBR o goma natural.

- Cis-1,4 poli-isopreno: Prácticamente idéntico a la goma natural, por lo que puede reemplazarla sin dificultad.
- Copolímeros de etileno/propileno (EP): Estos elastómeros resultan incompatibles con otros elastómeros de uso múltiple. Aunque pueden vulcanizarse con azufre mediante la introducción de un termonómero (como hexadieno o dicitopentadieno), esta acción incrementa notablemente los costos.
- Policloropreno o neopreno: Con aplicaciones amplias que aprovechan su resistencia a aceites y solventes.

De acuerdo con el código del International Institute of Synthetic Rubber Producers (Instituto Internacional de Productores de Goma Sintética, IISRP), los copolímeros de SBR se clasifican en diferentes categorías:

- SBR serie 1000: Copolímeros obtenidos por copolimerización en caliente.
- SBR serie 1500: Copolímeros obtenidos por copolimerización en frío. Sus propiedades dependen de la temperatura de reacción y del contenido de estireno y emulsificante. La variación de estos parámetros afecta el peso molecular y por lo tanto las propiedades de la mezcla vulcanizada.
- SBR serie 1700: SBR 1500 extendida con aceite.
- SBR series 1600 y 1800: Se mezcla negro de carbón con goma SBR 1500 durante la producción mediante la incorporación de una dispersión acuosa de negro de carbón con el látex de SBR previamente extendido con aceite. Se obtiene una mezcla maestra cercana al producto final luego de la coagulación y secado.

En términos generales, los cauchos SBR comparten equipos y métodos de procesamiento con el caucho natural, diferenciándose mayormente en cuestiones de detalle o escala. Otro contraste discernible entre el SBR y el caucho natural radica en la menor adhesión que presenta en su estado crudo el primero. Esta particularidad le permite ser mezclado con mayor eficiencia, gracias a su mayor capacidad de carga (debido al uso de negro de humo), utilizando el ciclo “up-side

down”, lo que conlleva a una dispersión óptima en un tiempo menor. En términos de extrusión, los SBR presentan propiedades superiores a las del caucho natural, principalmente debido a una menor propensión a la prevulcanización, a menos que el nivel y tipo de negro de humo desempeñe un papel más importante en este aspecto que el propio caucho (Friedenthal, 2004).

### **Propiedades de rotura**

En cuanto a los cauchos SBR, es importante señalar que en su estado original carecen de propiedades mecánicas destacadas, lo que demanda la incorporación de altos volúmenes de carga reforzante en los compuestos. Un elemento de suma relevancia es el tamaño de partícula del negro de humo empleado, el cual desempeña un papel esencial en la resistencia a la rotura de los compuestos de caucho SBR. En este sentido, se ha observado que los compuestos que incluyen negros de humo de partículas más pequeñas exhiben valores más elevados en términos de carga óptima. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que un exceso de negro de humo, más allá de cierto umbral, puede desencadenar una disminución en la capacidad de resistencia a la rotura de los compuestos (Askeland, 2001).

### **Propiedades dinámicas**

En términos de propiedades dinámicas, es importante destacar que el caucho SBR presenta ciertas limitaciones que restringen su utilidad en aplicaciones donde la generación de calor debido a sollicitaciones cíclicas es un factor relevante. Esto se debe a su fase plástica pronunciada, lo que se traduce en una alta histéresis en los vulcanizados de SBR. Este comportamiento podría ser la distinción más significativa en términos de propiedades dinámicas entre el caucho SBR y el natural. Esta desventaja se vuelve particularmente crítica en casos de productos de goma con espesores considerables que están expuestos a cargas repetitivas. La pobre conductividad térmica y, en consecuencia, la ineficacia para disipar el calor de la goma agrava la situación.

En situaciones de fatiga, el SBR exhibe una resistencia destacada a la formación de grietas, pero presenta debilidades en cuanto al crecimiento de las mismas o a la expansión de cortes, debido a sus propiedades de rotura relativamente bajas. Una manera de superar estas limitaciones es mediante la

combinación de las propiedades de diferentes tipos de caucho, utilizando mezclas en proporciones que se ajusten a los requisitos y condiciones específicas de uso a las que serán sometidos los compuestos (Friedenthal, 2004).

### **Degradación**

En lo que respecta a las dos formas de deterioro, se puede concluir que el caucho SBR supera al caucho natural tanto en términos de resistencia a la inversión como al ozono, así como en el envejecimiento oxidativo en un sentido más amplio. Su mayor resistencia al ozono amplía sus aplicaciones potenciales en productos que estarán expuestos a las condiciones climáticas, a menos que existan fundamentos sólidos para emplear otro tipo de elastómero de mayor resistencia. (International Tire And Rubber Association Foundation Inc., 2005)

### **Abrasión**

El caucho SBR destaca por su resistencia al desgaste, especialmente en situaciones donde el desgaste se debe a la fatiga causada por la fricción, superando en este aspecto al caucho natural. Esta superioridad lo ha llevado a ser ampliamente utilizado en las bandas de rodadura de neumáticos de automóviles. Sin embargo, su alta histéresis, que resulta en una mayor generación de calor, limita su aplicación en neumáticos de vehículos pesados, donde la disipación del calor es crucial para mantener la resistencia y durabilidad de la carcasa del neumático. La resistencia a la abrasión del caucho SBR varía según el tipo y cantidad de negro de humo utilizado en su formulación, y se ha observado que esta propiedad puede mejorarse notablemente mediante la combinación del caucho SBR con caucho polibutadieno en la composición (International Tire And Rubber Association Foundation Inc., 2005).

## **2.2 Neumáticos**

En la actualidad, los vehículos exhiben prestaciones sumamente elevadas, y se otorga una creciente relevancia a las funciones desempeñadas por las ruedas. Estas asumen la crucial tarea de soportar el peso del vehículo, transferir la potencia generada por el motor, garantizar la dirección precisa y permitir un frenado efectivo, culminando en un control óptimo sobre el vehículo en su conjunto.

La importancia de un buen neumático radica en que este es el único medio de

contacto entre el vehículo y el suelo, y ejerce las siguientes funciones:

- Soportar el peso del vehículo, de ahí que todos no deben llevar el mismo tipo de neumático.
- Participar en la sujeción del vehículo ante la tendencia del mismo a salirse en las curvas debido a la fuerza centrífuga.
- Soportar el vehículo cuando está parado, pero también en movimiento, y tiene que resistir las transferencias de cargas en la aceleración y el frenado.
- Amortiguar las irregularidades de la carretera, garantizando la comodidad del conductor y de los pasajeros, así como la longevidad del vehículo.
- Conservar las prestaciones al mejor nivel durante millones de vueltas de rueda. El desgaste del neumático depende de sus condiciones de uso, pero, sobre todo, de la calidad del contacto con el suelo.
- La presión juega por tanto un papel esencial, actúa sobre: el tamaño y la forma de la zona de contacto y la distribución de esfuerzos sobre los distintos puntos del neumático.

### **Composición del neumático**

El proceso de transformación del caucho en bruto implica su amasado en molinos de masticación y mezcla, donde se utilizan dos rodillos que giran a velocidades distintas. Este procedimiento provoca el ablandamiento del caucho al inducir la ruptura de sus moléculas largas en fragmentos más reducidos. Después de ser amasado se agregan: negro de carbón, óxido de zinc, azufre, caucho regenerado y ablandadores. Cada uno de estos ingredientes cumple una finalidad determinada.

En el proceso de transformación del caucho, se emplean agentes aceleradores de naturaleza química con la finalidad de acortar el tiempo necesario para la vulcanización, al mismo tiempo que brindan protección al caucho terminado contra los efectos del envejecimiento provocado por la luz y el aire. Estos aceleradores desempeñan un papel esencial en la optimización del proceso.

Asimismo, para conferir propiedades específicas al caucho, se utilizan ablandadores o plastificantes, que pueden consistir en aceites minerales o vegetales, ceras y alquitranes. Estos componentes contribuyen a modificar la

flexibilidad y maleabilidad del material, permitiendo la obtención de características deseadas en el producto final.

Una vez completada la fase de masticación, el caucho avanza a través de calandrias, que se componen de tres rodillos huecos dispuestos en vertical. Este proceso somete al caucho a un laminado que resulta en la formación de hojas delgadas. Además, entre los rodillos, se incorporan tejidos de algodón, logrando la adhesión del caucho a este material y generando láminas finas con propiedades específicas.

El proceso de creación de un neumático implica diversas etapas cuidadosamente orquestadas. Comienza con el corte del tejido revestido de caucho en tiras, estratégicamente dispuestas para formar ángulos que aumenten la resistencia de la estructura. Estas tiras se moldean alrededor de un núcleo de hierro, dando forma al armazón esencial del neumático. La superficie de rodadura se configura alrededor de este armazón mediante el uso de una tira de caucho masticado y compuesto, mientras que en el borde se coloca una tira especialmente resistente con hilos de alambre, que conforma el borde del neumático y entra en contacto con la pestaña de la rueda.

Una vez completado el ensamblaje, el neumático es posicionado en un molde previamente esculpido con el patrón de rodadura deseado. La combinación de calor, administrado mediante vapor, y presión, desencadena la vulcanización del caucho gracias al azufre presente en su composición, fortaleciendo y consolidando la estructura del neumático. Una minuciosa inspección verifica la calidad del producto final, que es cuidadosamente preparado y embalado para su posterior distribución (Rubber & Plastic News, 1998).

Además del caucho natural, se emplea otro material para la fabricación de neumáticos: el caucho sintético, el cual se obtiene en su mayoría a partir del petróleo crudo. Un ejemplo de esto es el SBR o "Bruna S", elaborado a partir de estireno y butadieno, tal como se mencionó previamente. Este tipo de caucho sintético ha sido ampliamente utilizado en la banda de rodadura de los neumáticos, demostrando una durabilidad superior al caucho natural con un aumento del 30 % en su vida útil. En la actualidad, alrededor de la mitad del consumo total de caucho proviene de variedades sintéticas, lo que resalta la creciente importancia y uso de estos materiales en la industria de neumáticos.

### **2.2.1. Partes del neumático**

En su esencia, una rueda neumática se configura como un espacio teórico lleno de aire bajo presión, con la capacidad de absorber las imperfecciones del camino. Esta característica, en conjunto con el sistema de suspensión, desempeña un papel crucial en brindar comodidad a los ocupantes del vehículo. En ella se pueden diferenciar cuatro partes principales, Figura 2.1 (Arias, 2004).

La función principal de la estructura textil es prevenir la expansión excesiva de la cámara debido a la sobrepresión del aire, a la vez que confiere estabilidad dimensional al conjunto. Para lograr esto, se utilizan materiales como tejido de rayón, nailon o poliéster en su composición.

#### **La banda de rodamiento**

La superficie exterior circular de la cubierta, situada sobre la carcasa, cumple la función de evitar la fricción directa de esta última con la superficie del pavimento. Este componente exhibe una alta capacidad de resistencia a la abrasión, lo que minimiza el desgaste ocasionado por la fricción. Además, desempeña múltiples roles, tales como proporcionar adherencia, facilitar la evacuación del agua, contribuir al confort acústico, entre otros beneficios.

En términos de composición, se utilizan diversos materiales para su elaboración, incluyendo caucho natural, caucho sintético, negro de humo, sustancias de vulcanización y elementos para proteger contra el envejecimiento prematuro.

#### **Los flancos o costados de la cubierta**

Su función es salvaguardar la carcasa de los impactos del clima y de posibles laceraciones mecánicas, como las que podrían ocurrir debido al roce con bordillos u obstáculos en la acera. Adicionalmente, actúa como punto de conexión entre la banda de rodadura y los talones de la cubierta, y alberga las marcas de identificación de la misma. En términos de composición, esta parte de la cubierta puede estar elaborada con diversos materiales, como caucho natural, caucho sintético, negro de humo, sustancias de vulcanización y componentes para proteger contra el envejecimiento prematuro.

## Los talones

Estos elementos rígidos, conocidos como talones, desempeñan un papel crucial en la cubierta al ajustarse a las pestañas de la llanta, evitando así que la cubierta se desprenda debido a las deformaciones. Están contruidos utilizando materiales como goma dura e hilos de acero para lograr esta función de sujeción y estabilidad.

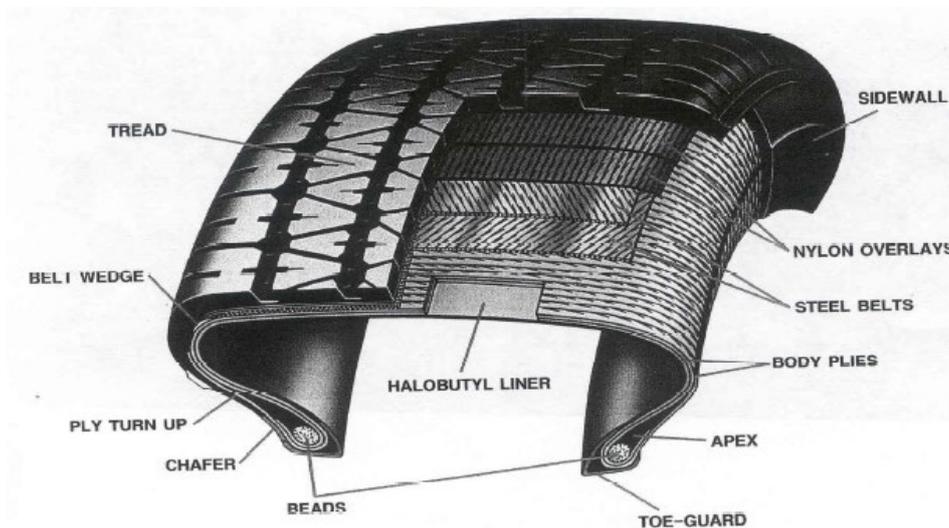


Figura 2.1. Esquema de partes de un neumático. (Segura et al., 2018)

### 2.2.2. Tipos de neumáticos y su fabricación

En las denominadas cubiertas sin cámara, conocidas como "tube-less", se implementa un enfoque donde la cámara se integra directamente en la propia estructura de la cubierta. Esto se logra incorporando una capa interna en la cubierta, que consiste en una lámina de material con un grosor de aproximadamente 1,5 - 2,5 mm y que posee una baja permeabilidad al aire. La función principal de esta lámina es doble: en primer lugar, contribuye significativamente a mantener la presión del aire en el neumático y, en segundo lugar, evita la difusión del aire a presión dentro de la cubierta, previniendo así desprendimientos entre los distintos componentes de la cubierta. Este enfoque elimina la necesidad de una cámara de aire tradicional y ofrece ventajas en términos de rendimiento y seguridad.

Existen dos categorías principales de cubiertas según la estructura de su carcasa: las cubiertas convencionales o diagonales, y las cubiertas radiales. En las cubiertas convencionales, la carcasa se compone de múltiples capas, conocidas como telas o lonas, cuyos hilos se extienden oblicuamente desde un talón hasta el opuesto. La inclinación de los hilos en cada capa es exactamente opuesta a la

inclinación de los hilos en las capas adyacentes.

Por otro lado, en las cubiertas radiales, el número de capas de tela es menor y sus hilos se extienden radialmente desde un talón hasta el otro. En ambas categorías, las capas de tela se pliegan sobre sí mismas alrededor de los arcos metálicos del talón para asegurar la sujeción de las capas en la estructura de la cubierta.

Adicionalmente, en las cubiertas radiales se incluye un cinturón ubicado bajo la banda de rodadura, con hilos dispuestos en un ángulo casi circunferencial y opuesto en capas sucesivas que forman el cinturón. Esta característica proporciona características específicas de desempeño.

En el año 1948, en pleno contexto de la Segunda Guerra Mundial, Michelin introdujo una innovación revolucionaria en la industria de neumáticos: los neumáticos radiales con bandas de cables de acero. Esta novedad, denominada "radial", se distingue por la disposición de los cables de las lonas en un ángulo de 90 grados con respecto a la línea central de la llanta. Adicionalmente, para fortalecer aún más la estructura del neumático, se incorpora un cinturón de lona de acero que recorre toda la circunferencia, brindando estabilidad al neumático.

Antes de esta introducción, prevalecían los neumáticos de construcción diagonal, también conocidos como convencionales, en los cuales las lonas se extendían oblicuamente desde un talón al otro del neumático. Estas lonas se dispusieron en una dirección diagonal, mientras que las capas subsiguientes se colocaban en dirección contraria, formando una trama cruzada. Este cambio en la tecnología de neumáticos marcó un hito significativo en la industria automotriz y tuvo un profundo impacto en la eficiencia, durabilidad y rendimiento de los vehículos (Botasso, 2018).

### **2.2.3. La industria de los neumáticos**

Tres grandes fabricantes de neumáticos, Bridgestone, Michelin y Goodyear, tienen un control conjunto del 58 % del mercado mundial desde hace más de cinco años. En 2012, estos tres fabricantes y sus filiales representaron ventas por un total de 76000 millones de dólares, lo que equivale al 40 % de las ventas globales de neumáticos. Su cuota de mercado ha crecido a medida que han expandido su alcance geográfico a través de adquisiciones y empresas conjuntas. Estas tres

empresas generan al menos el 75 % de sus ingresos a través de la fabricación de neumáticos.

En un segundo grupo de fabricantes de neumáticos destacan Pirelli, Continental AG y varios productores asiáticos como Sumitomo, Yokohama, Hankook, Cheng Shin/Maxxis International y Hangzhou Zhongce. Estos fabricantes, en conjunto, controlan alrededor del 25 % de las ventas globales de neumáticos. Además, Hangzhou Zhongce, un fabricante chino de neumáticos con participación estatal del 50 % y asociación con Zhongce Investment de Hong Kong, también forma parte de este grupo.

Goodyear ha establecido una asociación conjunta en América del Norte y Europa con Sumitomo, en la que tienen una participación de 75/25, para producir neumáticos Dunlop. Sumitomo, por su parte, controla el 80 % de P.T. Sumi Caucho en Indonesia.

Bridgestone obtiene ingresos de su participación del 34 % en BRISA, una empresa en Turquía, y también de su participación del 16 % en Nokian, una compañía finlandesa.

El fabricante de neumáticos líder mundial, Bridgestone, continúa generando el 21 % de sus ventas en Asia, donde opera 11 plantas de neumáticos y alrededor de 20 instalaciones con diversos productos de caucho. Michelin posee una participación del 10 % en Hankook y otra del 10 % en P.T. Gajah Tunggal, el vigésimo sexto fabricante de neumáticos más grande, en el cual GITI Tire Pte. Ltd. de Singapur tiene una participación del 49,8 %. Mitsubishi Corp. ha aumentado su participación en Toyo Tire & Caucho Co en aproximadamente un 6 % mediante una inversión de 25 millones de dólares.

Entre las 75 empresas líderes en la industria de neumáticos, se distribuyen de la siguiente manera: China alberga a 24 de ellas, India a 10, Europa a 9, Taiwán a 5, mientras que Japón y Estados Unidos cuentan con 4 cada uno. Por su parte, Rusia y Corea contribuyen con 3 empresas respectivamente.

La fabricación anual, para el año 2018, de neumáticos alcanza alrededor de 1300 millones de unidades, y esta cantidad está prevista que aumente en los próximos años debido al crecimiento en las economías en desarrollo. Se estima que la industria en su conjunto experimentará un crecimiento anual de ingresos

cercano al 7 %, con el objetivo de alcanzar una cifra total de 220000 millones de dólares en el año 2015, según la fuente citada.

Los principales fabricantes de neumáticos y productos de caucho en general consideran que América Latina está experimentando un crecimiento significativo. En Argentina, debido al nivel de madurez alcanzado en su industria automotriz y al desarrollo de sus instalaciones de fabricación de neumáticos, también ha experimentado un aumento en la última década.

En el año 2018, en Argentina se manufacturan aproximadamente 20 millones de neumáticos al año, abarcando una variedad de usos, de los cuales alrededor de 14 millones están destinados a vehículos automotores. Estos neumáticos se producen tanto para el consumo local como para su exportación. Hoy producen neumáticos en Argentina una empresa nacional y dos multinacionales (Botasso, 2018).

#### **2.2.4. Generación de neumáticos**

Uno de los elementos más emblemáticos de las sociedades modernas altamente desarrolladas y fuertemente ligadas al uso de automóviles son los neumáticos que ya no se utilizan.

Además, diversas áreas de producción como la minería, el transporte de carga y pasajeros por carretera, la agricultura y cualquier tipo de vehículo que dependa de neumáticos, eventualmente, requerirán cambiar sus ruedas desgastadas. Cuando estos neumáticos desgastados son descartados debido a un cambio, se les llama Neumáticos Fuera de Uso, abreviado como NFU.

La generación de NFU se puede decir que es la siguiente:

- En Estados Unidos se generan unos 274 millones de unidades de NFU por año según (Rubber Manufacturers Association, 2021).
- Según datos de SIGNUS (2022), sistema integrado de gestión español de gestión de NFU, en España unas 200000 t/año son desechadas.
- En Brasil, según el programa RECICLANIP (2022) 441.000 t/año de pneus (neumáticos) son declaradas.

- En Argentina se generan unas 135000 t/año según datos de la cámara de la industria del neumático citar informe del ministerio de ambiente (MAyDS 2020)

La generación en Argentina a la que se hace referencia se distribuye aproximadamente de la siguiente manera: un 8 % en la región del Noroeste Argentino (comprendiendo Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca y Santiago del Estero), otro 8 % en la región de Cuyo (abarcando La Rioja, San Juan, Mendoza y San Luis), un 18 % en la región del Noreste Argentino (incluyendo Formosa, Chaco, Misiones, Corrientes, Entre Ríos y Santa Fe), un 58 % en la región Centro (constituida por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Córdoba y La Pampa) y finalmente un 8 % en la región Sur (englobando Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego). (Rodríguez, 2019).

Entre 2013 y 2018, el volumen reciclado de NFU en Argentina muestra una tendencia ascendente, consolidando 69,2 % de incremento para el período como lo refleja la Figura 2.2 (MAyDS 2020).

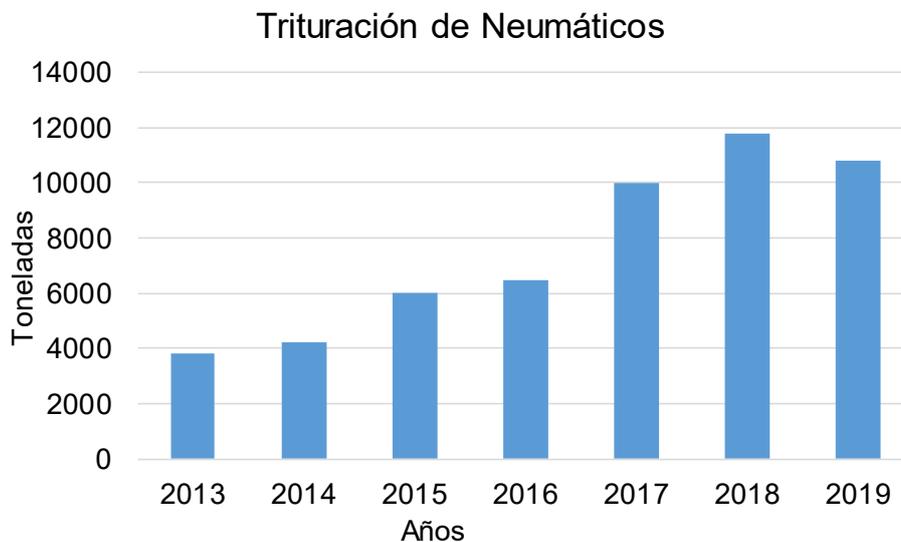


Figura 2.2. Trituración de NFU en Argentina. (MAyDS 2020 adaptado)

Se estima que el neumático usado medio, de un coche o de un camión ligero, pesa aproximadamente 9,5 kg. Los neumáticos industriales y de camiones pueden pesar desde 16 kg hasta más de 100 kg (Lund, 1996).

## 2.3 Ambiente

### 2.3.1. Desarrollo sostenible

La utilización de la energía ejerce una influencia significativa en prácticamente

todos los aspectos del entorno natural. La búsqueda frenética de recursos energéticos para satisfacer las demandas industriales ha impulsado el crecimiento económico; el acceso a nuevas fuentes de energía ha desempeñado un papel crucial en la mejora de la calidad de vida de los habitantes de nuestro planeta. No obstante, esta búsqueda también ha conllevado un alto precio ambiental: derrames de petróleo, degradación del suelo debido a actividades mineras, contaminación del agua y el aire, así como la amenaza del calentamiento global debido a la acumulación de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. El deseo de mantener un suministro de energía constante, asequible y en constante expansión a menudo entra en conflicto con la preservación del medio ambiente.

El concepto de desarrollo sostenible ocupa un lugar destacado en los debates relacionados con el medio ambiente. Un número considerable de empresas ha abrazado la filosofía intrínseca al desarrollo sostenible al adoptar medidas que van más allá de los requisitos legales para proteger el entorno natural. El emergente campo de la Industria ecológica desempeña un papel fundamental en la promoción del desarrollo sostenible al implementar estrategias destinadas a reducir el consumo de recursos. La cuestión de la energía plantea desafíos significativos en términos de mantener un desarrollo sostenible. La quema de depósitos terrestres de petróleo, gas y carbón representa una práctica claramente incompatible con el enfoque sostenible. La razón primordial para limitar su utilización radica en su contribución al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>, el producto final del proceso de combustión.

De todas maneras, los recursos de combustibles fósiles no constituyen una fuente de energía inagotable; su período de viabilidad puede extenderse por décadas o incluso siglos, según las políticas energéticas que se adopten. En la actualidad, nuestra dependencia de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas y el carbón, es sustancial. Hace ciento cincuenta años, nuestra principal fuente de energía era la madera, pero posteriormente, durante la Revolución Industrial, el carbón la reemplazó. En las últimas cinco décadas y en la actualidad, el gas y el petróleo son las fuentes predominantes de energía. No obstante, esto representa sólo una etapa en nuestra evolución, ya que los recursos de combustibles fósiles se agotarán, abriendo paso a otras modalidades de obtención de energía. Las predicciones sobre la disponibilidad de un recurso energético están vinculadas a

la inversión monetaria y al esfuerzo necesario para su extracción. El suministro de energía y la sustitución de recursos se ven fuertemente influenciados por la velocidad a la que consumimos energía. La disminución del consumo energético conlleva la reducción del impacto ambiental, prolonga las reservas disponibles y amplía el período para el desarrollo de nuevas tecnologías. (Spiro et al., 2004).

La incorporación de polímeros reciclados, como el polvo de neumáticos triturados, en la modificación de mezclas asfálticas es una técnica orientada a reducir la necesidad de polímeros vírgenes, los cuales se derivan del petróleo. Además, esta técnica implica reemplazar una fracción del asfalto convencional con un residuo, en este caso neumáticos usados. Este enfoque tiene un doble propósito: primero, permite dar un nuevo propósito a los neumáticos desechados, mitigando su impacto ambiental; y segundo, disminuye el requerimiento de petróleo al sustituir dos componentes de origen petrolífero en la mezcla. En consecuencia, esta sustitución no sólo contribuye a la reutilización de neumáticos en desuso, reduciendo su huella ambiental, sino que también minimiza el consumo de petróleo al reemplazar materiales cuya fabricación está relacionada con él. Esto, a su vez, tiene un efecto positivo al extender el periodo de disponibilidad de las reservas petroleras, facilitando la emergencia de nuevas tecnologías enfocadas en un uso energético más eficiente y en la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.

### **2.3.2. Neumáticos y sus efectos en el ambiente**

En la actualidad, los neumáticos desechados representan uno de los desafíos más apremiantes debido a sus características particulares, lo que demanda una atención especial. Aunque no son catalogados como residuos peligrosos, sí requieren una gestión específica en la categoría de residuos urbanos asimilables. La responsabilidad de gestionar esta problemática recae en los gobiernos municipales, que, por sí solos, se encuentran limitados en su capacidad técnica y económica para abordarla de manera efectiva. Dado este escenario, la administración debe desempeñar un papel crucial en la planificación y ejecución de la recolección y tratamiento de estos neumáticos en desuso. En este proceso, es esencial la participación de las empresas involucradas en la producción y distribución de neumáticos, las cuales deben asumir un papel activo. (Carrasco, 1998).

Por otro lado, si se hace la disposición final de estos neumáticos en vertederos, surgen desafíos significativos. Su forma y composición hacen que no sean fácilmente compactables ni se descompongan con facilidad. Por consiguiente, los neumáticos usados ocupan un espacio considerable en los vertederos. A medida que la capacidad de los vertederos disminuye en su mayoría y los costos asociados con la eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) aumentan, ya no es factible aceptar materiales voluminosos como los neumáticos. Adicionalmente, debido a su estructura hueca, los neumáticos pueden atrapar aire y otros gases, lo que los convierte prácticamente en boyas. Con el tiempo, estos neumáticos "flotan" hacia la superficie, rompiendo la cobertura del vertedero. Este fenómeno crea aperturas que exponen el vertedero a la entrada de roedores, insectos y aves, y permite la liberación de gases no deseados, lo que desencadena procesos indeseables. Estas aperturas también facilitan la entrada de precipitación al vertedero, generando líquidos no deseados conocidos como lixiviados (Lund, 1996).

### 2.3.3. Alternativas de recuperación

Las dos únicas posibilidades de reutilización de neumáticos usados, como tales neumáticos sin variar su estructura son el recauchutado y la utilización directa.

#### Recauchutado

Consiste en sustituir la banda de rodadura desgastada por una nueva, lo que permite que se prolongue la duración del resto de la cubierta por un período similar a la duración de una cubierta nueva y con prácticamente las mismas prestaciones, Figura 2.3.



Figura 2.3. Etapas de recauchutaje de neumáticos. (En pocas palabras, 2006)

### **Utilización directa**

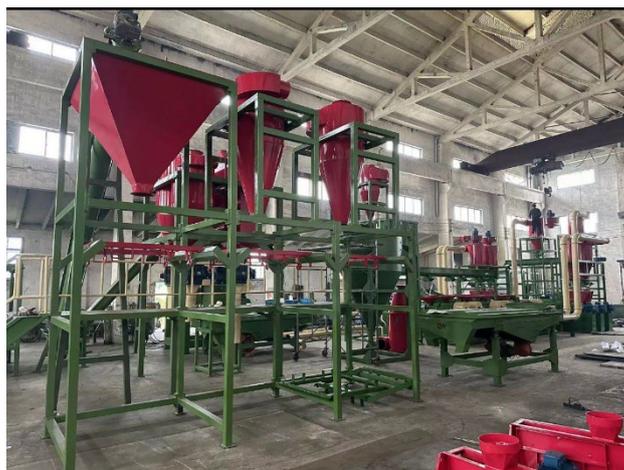
La utilización directa sólo consume una parte mínima de los neumáticos usados y nunca podrían considerarse como una solución del problema global. Entre las aplicaciones directas se pueden destacar: defensas de muelles y embarcaciones, arrecifes artificiales, rompeolas, barreras de protección en vías de tránsito, protección de capas impermeabilizantes en vertederos de residuos.

### **Tratamientos alternativos**

Actualmente los sistemas de tratamiento más experimentados y utilizables para valorizar estos residuos son: trituración a temperatura ambiente, trituración criogénica, incineración con recuperación de energía, pirolisis, termólisis.

### **Trituración a temperatura ambiente**

La obtención de "gránulos" de varios tamaños a partir de neumáticos usados involucra un proceso puramente mecánico de trituración, el cual se desglosa en distintas etapas según sea necesario, Figura 2.4. Entre las fases implicadas en este tipo de producción se incluyen: trituración inicial, separación magnética, pregranulación, separación mediante ciclones, segunda separación magnética, granulación, tamizado y almacenamiento. La efectividad de la separación entre los fragmentos de acero y los textiles de caucho depende del nivel de trituración alcanzado en el proceso.



*Figura 2.4. Imagen de planta de triturado de NFU. (Botasso, 2018).*

### **Trituración criogénica**

Este proceso de tratamiento implica exponerlos a bajas temperaturas alrededor de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , utilizando nitrógeno líquido, para crear una espuma criogénica, Figura

2.5. Esta operación se lleva a cabo en un túnel cerrado en ciclo, el cual está aislado al vacío. Durante este procedimiento, el caucho en los neumáticos se torna quebradizo debido a las bajas temperaturas. Este enfoque conlleva a una molienda extremadamente eficiente, reduciendo las partículas a un tamaño cercano a 0,1 mm. Además, se logra una separación efectiva de cenizas, acero y fibras textiles presentes en los neumáticos (Hervás, 2006).



*Figura 2.5. Instalación criogénesis para caucho. (Hervás, 2006)*

### **Incineración**

El método de tratamiento en cuestión implica someter los materiales orgánicos a una combustión a temperaturas elevadas, lo cual requiere la utilización de revestimientos refractarios de alta calidad en los hornos, lo que a su vez incurre en un costo significativo. Para cumplir con las regulaciones vigentes, también se demanda un nivel sustancial de purificación de los gases generados durante el proceso. Una de las ventajas de este enfoque es su capacidad para inducir un efecto exotérmico, que puede ser aprovechado como fuente de energía, ya sea para alimentar el propio proceso o para otros propósitos.

### **Pirólisis**

El procedimiento involucra la degradación térmica del material en un entorno libre de oxígeno o con una presencia reducida de este, lo que resulta en la generación de gases y aceites que pueden emplearse como combustibles. Como residuo final quedan los componentes metálicos y el negro de carbono. Este método de tratamiento ofrece la ventaja de producir productos orgánicos útiles en la industria y de lograr una degradación completa del neumático. Sin embargo, plantea el desafío de separar una amplia gama de componentes generados, especialmente cuando la mayoría de ellos se producen en cantidades pequeñas (Hervás, 2006).

## Termólisis

El método se fundamenta en exponer el material polimérico del neumático a un gradiente térmico cercano a los 500 °C, en una atmósfera carente de oxígeno. Como resultado de las reacciones de degradación térmica, los enlaces químicos se rompen (craqueo), lo que da lugar a la formación de hidrocarburos de distintas longitudes de cadena. Estos hidrocarburos constituyen la fase gaseosa y sólida, siendo los principales componentes gaseosos el H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarburos y vapor de agua. En términos de los sólidos generados, se trata de productos carbonosos que pueden ser utilizados como materia prima para combustibles o como sustitutos de otros materiales (como material filtrante, cargas minerales, etc.) (Hervás, 2006).

## 2.4 Caracterización del polvo de neumático seleccionado

Se han obtenido muestras de polvo de NFU en el mercado local de dos proveedores y se procedió a su caracterización. Una de ellas se descartó por presentar impurezas que no son compatibles con el proceso de elaboración del asfalto con polvo de NFU.

En términos físicos, es posible definir condiciones a cumplir en relación con la densidad relativa, la densidad aparente y la cantidad de agua presentes en el entorno (FER, 2019), Tabla 2.1.

*Tabla 2.1. Valores esperados en aspectos físicos del polvo de NFU*

<b>Ensayo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Norma de ensayo</b>
Densidad Relativa [g/cm <sup>3</sup> ]	1,15	1,2	UNE 53526/2001
Densidad aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	0,5	0,55	
Contenido de agua [%]	< 1,00		UNE 103 300-3

En la experiencia a nivel global en la aplicación de polvo proveniente de (NFU) en la mejora de ligantes asfálticos, se establece un rango para la distribución de tamaños de partículas. Esta distribución debe situarse entre un tamaño máximo nominal de 2,0 mm, según la malla 10 de la norma ASTM E11 (2022), y un tamaño mínimo de 0,063 mm, según la malla 230 de la norma ASTM E11 (2022).

El manual de utilización de caucho proveniente de (NFU) en mezclas asfálticas del (CEDEX, 2007) detalla los siguientes intervalos de tamaños de partículas para el polvo de caucho de NFU, los cuales se encuentran detallados en la Tabla 2.2.

*Tabla 2.2. Entornos granulométricos del polvo de NFU*

<b>Tamiz (UNE EN 933-2)</b>	<b>P-1</b>	<b>P-2</b>	<b>P-3</b>
2,00 mm (N° 10)	100		
1,41 mm (N°14)	75-100		
1,00 mm (N° 18)	45-90	100	
0,50 mm (N° 35)	30-80	10-80	100
0,25 mm (N° 60)	5-50	5-70	0-40
0,125 mm (N° 125)	0-30	0-30	0-25
0,063 mm (N° 230)	0-15	0-15	0-15

En la Figura 2.6 se puede observar una vista de las muestras analizadas y utilizadas en la tesis.



*Figura 2.6. Muestra de polvo de NFU. (Fuente propia)*

En la Tabla 2.3 se puede observar la granulometría de la muestra seleccionada para la tesis.

*Tabla 2.3. Granulometría de la muestra utilizada*

<b>Tamiz</b>	<b>Pasante [%]</b>
2,00 mm (N° 10)	100
1,68 mm (N° 12)	100
1,41 mm (N° 14)	100
0,71 mm (N° 25)	86
0,50 mm (N° 35)	48,62
0,25 mm (N° 60)	8,22
0,125 mm (N° 120)	0,47
0,063 mm (N° 230)	0,45

Se ha incluido el tamiz con una abertura de 0,71 mm, ya que en éste la muestra ha demostrado pasar el 86 %, como se indica en la Tabla 2.3, cumple con los requisitos del entorno P1, tal como se detalla en la Tabla 2.2. Posteriormente, se

realizó la medición de las densidades y los contenidos de agua. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.4.

*Tabla 2.4. Ensayos físicos de la muestra de polvo de NFU utilizada*

<b>Ensayo</b>	<b>Valor</b>
Densidad Relativa [g/cm <sup>3</sup> ]	1,175
Densidad aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	0,538
Contenido de agua [%]	0,560

## 2.5 Referencias

Arias, Paz. (2004). Manual del automóvil, Editorial Muriel S.A. ISBN 84-89656-58-4. Madrid, España. pp 1183.

Askeland, Donald R. (2001). Ciencia e Ingeniería de los Materiales. ISBN 9788497320160. Madrid, España. pp 824.

ASTM E11 (2022). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. American Society for Testing and Materials. pp 12.

Baumann, A., Belger, P., Duesberg, W., Aktuell, G. (2000). Stoffliche Verwertung von Altreifen Gummiabfällen. Magazine N°56. Stuttgart, Alemania. Gas Aktuell. pp 234-243.

Botasso, G. (2018). Dispersiones de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso. Su empleo en mezclas asfálticas densas y antiderrapantes. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-87-5. pp 268.

Carrasco, O. (1998). Factibilidad técnico económica de distintos usos del caucho proveniente de neumáticos usados. Memoria para optar al título de ingeniero Civil Industrial. Santiago de Chile. Universidad de Chile.

CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España. Madrid, España. ISBN 978-84-7790-450-2. pp 63.

Eldin, N. N., Senouci, A. B. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregates. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, Vol. 5, No. 4. ISSN 0899-156. pp. 478-496.

En pocas palabras (2006). El Plan Gira: El Programa De Neumáticos Fuera De Uso. Observatorio de Medio Ambiente. Comunidad de Madrid.

Engineering Plastics. (1999). Engineered Materials Handbook. Vol.2. Asm International. ISBN 978-0-87170-280-7. pp 883.

FER (2019). Federación española de la recuperación y reciclaje. Experiencia española del caucho NFU en las mezclas asfálticas. España. pp. 51.

Friedenthal, E. (2004). Tecnología Básica del Caucho. CITIC. Centro de Investigaciones Tecnológicas de la Industria del Caucho. España.

Hervás, R. L. (2006) Los residuos urbanos y asimilables. Capítulo IX: Los neumáticos fuera de uso. Junta de Andalucía. Comunidad Europea. Fondo Europeo de cohesión. ISBN 87-95785-83-8. pp 279-303.

International Tire And Rubber Association Foundation, Inc. (2005). Louisville, Kentucky.

Lund, H.F. (1996). Manual Mc Graw-Hill de Reciclaje Vol. I. Interamericana. Madrid, España. ISBN 84-481-0728-4.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MAyDS (2020). Informe del estado del ambiente. Argentina. ISBN 978-987-48011-5-9. pp 694.

RECICLANIP (2022). O ciclo sustentável de pneu. Sao Paulo. Brasil. Editorial RECICLANIP.

Rodríguez, D. (2019). I Jornadas Chilenas de Reciclaje de Neumáticos. Sociedad Latinoamericana de Tecnología del Caucho. "Caucho para superficies deportivas". Santiago de Chile.

Rubber & Plastic News (1998b). Road Work Ahead, Rubber and Plastic News, The Rubber Industry's International Newspaper, Crain Publications. Washington DC, USA. pp. 124-210.

Rubber Manufacturers Association. (2021). Scrap tires characteristic. Washington DC.

Segura, A., Positieri, M., Botasso, G. (2018). Libro: Utilización de asfalto modificado con NFU. Elaboración de un microconcreto discontinuo en caliente. Volumen I. Publicia. London, United Kingdom. ISBN: 978-620-2-43179-8. pp 286.

Seymour, R. B.; Carraher, C. E. (1995). Introducción a la Química de los Polímeros. Reverté. Madrid. ISBN 978-84-291-7926-2. pp 743.

Shackelford, J. F. (2002) Ciencia de Materiales para Ingenieros. Tercera edición. ISBN 9789688804759. pp 912.

SIGNUS (2022). Memoria anual. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso. Madrid, España. pp 65.

Smith, F. W (2001) Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. Tercera edición. Mc Graw-Hill. ISBN 8448114299. pp 715.

Spiro, T., Stigliani, W. (2004). Química Medioambiental. ISBN 84-205-3905-8. pp 520

Tropac, F. (2001). Historia del caucho. Indonesia. Mc Graw Hill.

Zehev, T., Costas, G., John Wiler And Sons (2006). Principles of polymer processing. 0-471-38770-3. pp 992.



# Capítulo 03: Pavimentos flexibles: sus deterioros, rehabilitación y modelo de reflejo de fisuras utilizado

---

## RESUMEN

El capítulo contiene una breve descripción de las capas que componen a un pavimento flexible, sus fallas y tipos de fisuras. Luego en un pavimento deteriorado, las alternativas de rehabilitación y en particular una capa intermedia como retardo de fisura, la importancia de la adherencia entre estas capas a través de los riegos de liga y la descripción de la emulsión utilizada para esta tesis. También la formación y los mecanismos de propagación de fisuras existentes, a través de las carpetas colocadas sobre ellas. Asimismo, una revisión de los ensayos y equipos que permiten evaluar dicho comportamiento. También, cuál de ellos es el disponible para la valoración en la presente investigación, el modelo de reflejo de fisuras utilizado, su descripción y la metodología de confección del elemento de ensayo, usados. Asimismo, se resalta que, considerando la diversidad de modelos presentes en la bibliografía consultada, se parte del trabajo previo de Delbono (2014) que establece las bases de aplicación de la metodología, y siendo ésta la tecnología disponible para la realización de esta investigación, se ha considerado eficaz el método utilizado para evaluar el progreso de la fisuración. Además, el objetivo de este estudio es analizar la respuesta ante la fisuración refleja de nuevas propuestas tecnológicas en mezclas asfálticas, empleando un ligante modificado con una alta proporción de polvo de NFU y realizando una comparación relativa entre ellas. Por consiguiente, la evaluación se ha centrado en un análisis tecnológico, no pretendiendo desarrollar un sistema o metodología para valorar la aptitud de las mezclas mediante un procedimiento indirecto de determinación de la propagación de la fisura, como sería el caso de un estudio analítico de modelización.

### 3.1 Introducción

Los pavimentos son estructuras compuestas por capas de distintos materiales con funciones y características especiales. Su función es la de soportar las cargas del tránsito y del clima, transmitiéndolas en profundidad sin superar las tensiones y deformaciones admisibles de ellas, durante toda su vida útil. Asimismo, su superficie debe permitir la circulación en condiciones de seguridad y comodidad, bajo cualquier condición climática. Esto lleva a tener estructuras multicapa las cuales trabajan de manera conjunta, como se puede ver en la Figura 3.1.

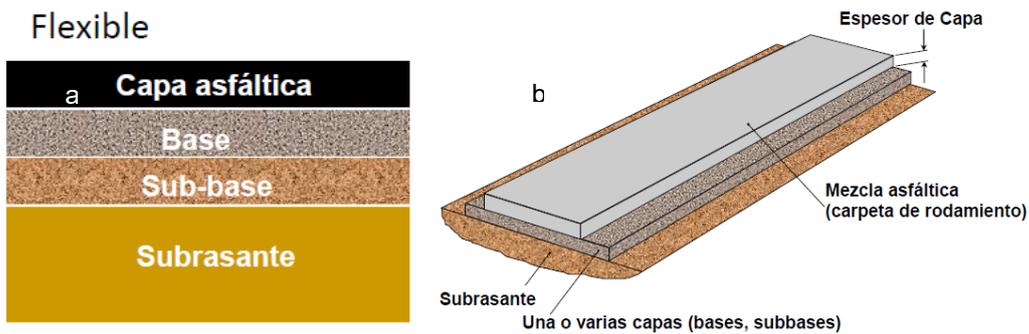


Figura 3.1. Estructura de pavimento flexible. a) Esquema corte. b) Esquema longitudinal. (Campana, 2014)

Estos deben prestar un adecuado nivel de servicio, así como proteger las capas subyacentes del agua. Estos objetivos se logran en la medida en que cada una de las capas del pavimento cumpla con la función para la cual fue concebida. Por esto, es importante una acorde calidad de los materiales a emplearse en cada capa y cumplir con los procedimientos de construcción especificados para ellas.

Los materiales presentan un papel fundamental en la ingeniería de pavimentos, en su mayoría los que se utilizan para su construcción, se pueden clasificar en tres grandes grupos: granulares, asfálticos y cementados. Con ellos se elaboran las distintas capas vistas en la anterior Figura 3.1, logrando así diferentes capacidades y módulos crecientes hacia la superficie. Por otro lado, cuando la carga es aplicada en la parte superior, la estructura se flexiona originando esfuerzos y deformaciones en cada una de las capas del mismo. La magnitud de estos y deflexiones dependen del tipo de carga y la configuración de cada uno de los ejes de los vehículos que la transitan. La combinación de éstos y las respuestas de la estructura determinará el tipo y grado de deterioro en la misma.

Por otro lado, toda estructura posee defectos que pueden haber sido originados

en la etapa de construcción o durante el servicio y crecer hasta alcanzar un estado en que debe ser reparada para prolongar su vida útil. Las fisuras constituyen uno de los primeros defectos que se evidencian y pueden afectar la apariencia de la superficie, corresponder a fallas de la estructura o por fatiga de los materiales, en todos los casos favorecen el ingreso de agua a las capas inferiores aumentando el deterioro de las mismas.

### **3.1.1. Fallas en pavimentos flexibles**

En el transcurso de la vida de servicio de un pavimento existen distintas causas de diverso origen que afectan la condición de la superficie de rodamiento, lo cual compromete su función de ofrecer a los usuarios los objetivos antes comentados. Entre las causas de falla de un pavimento se pueden mencionar:

1. Fin del período de diseño proyectado y ausencia de acciones de rehabilitación durante el mismo.
2. Incremento del tránsito con respecto a las estimaciones del diseño.
3. Deficiencias en el proceso constructivo o en la calidad de los materiales empleados.
4. Diseño deficiente.
5. Factores climáticos imprevistos.
6. Insuficiencia de estructuras de drenaje superficial y/o subterráneo.
7. Insuficiencia o ausencia de mantenimiento y/o rehabilitación de pavimentos.

Las fallas, dependiendo de su origen, pueden ser clasificadas como funcionales (superficiales) o estructurales. En el primer caso, el defecto se presenta en la superficie de la capa asfáltica y las acciones de reparación se dirigen a la corrección de la fricción, o al restablecimiento de la regularidad, lo cual se logra con la colocación de capas asfálticas de bajo espesor que no contribuyen desde el punto de vista estructural.

Por su parte, las estructurales tienen su origen en defectos en una o más de las capas que conforman la estructura. En estos casos su corrección, va dirigida al refuerzo de la estructura existente mediante la colocación de una capa cuyo espesor debe ser calculado en función de los requerimientos de las cargas de

tránsito para un determinado periodo de tiempo. La falla estructural puede ser por dos causas fundamentales (Corros et al., 2009):

1. Cuando la capacidad de deformación-recuperación de los materiales que conforman la estructura de pavimento es excedida más allá del valor que determinan las deformaciones recuperables por elasticidad instantánea y retardada. Así se desarrollan deformaciones permanentes, ahuellamiento, en cada aplicación de las cargas, las que se acumulan modificando los perfiles de la calzada hasta valores que resultan intolerables para la comodidad, seguridad y rapidez del tránsito. Estas pueden ocurrir a nivel de base, subbase, subrasante y capas asfálticas.
2. Cuando las deformaciones recuperables son elevadas, los materiales y en particular las capas asfálticas sufren el fenómeno denominado fatiga. Esto se encuentra asociado a un elevado número de aplicaciones de las cargas pesadas. En este caso la deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas, al flexionar la estructura, puede exceder el límite crítico y se llega a la iniciación del proceso de fisuramiento.

### **3.1.2. Fisuración en pavimentos flexibles**

La combinación de las diferentes fallas, configuración de las cargas, condiciones climáticas, etc., producirán distintos daños en los pavimentos. Las fisuras que aparecen en la capa de rodadura genera un grave problema de deterioro, el cual tiene asociado un elevado costo de mantenimiento. Aunque existen diferentes variables de daño en los pavimentos flexibles, se mencionan las de capa de rodadura, las cuales al pasar una serie de procesos se convierten en fisuras reflexivas, haciendo que el diseño de una capa de refuerzo adquiera mayor relevancia a la hora de retardar la aparición de dichas fisuras (Molina, 2008).

- a) La fisuración ocasionada por la variación de los ciclos diarios de temperatura que experimenta la mezcla asfáltica, lo cual origina su contracción. Este tipo es denominado fisuras por contracción o de bloque, no está asociado con las cargas impuestas por el tránsito. Están interconectadas y dividen al pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares, Figura 3.2.



*Figura 3.2. Fisuración por bloques por ciclos térmicos diarios. (Martínez et al., 2018)*

- b) Las fisuras cuyo origen es la falla por fatiga de la capa de rodamiento bajo acción repetida de las cargas de tránsito, deflexiones frente al pasaje de las cargas, envejecimiento que sufre la mezcla asfáltica, presencia de agua en capas inferiores y mal drenaje, generan microgrietas. Estas se van interconectando y propagando la plantilla de fisuras dando un entramado de las mismas. La fisuración se inicia en la fibra inferior de la capa asfáltica donde los esfuerzos y deformaciones unitarias de tensión son mayores cuando es solicitada. Inicialmente, se propagan a la superficie como una serie de grietas longitudinales paralelas. Después con las repeticiones de los ejes, se conectan formando polígonos con ángulos agudos que desarrollan un patrón que se asemeja a una malla de gallinero o a la piel de cocodrilo, ver Figura 3.3. Generalmente, el lado más grande de las piezas no supera los 0,60 m, y se diferencia del anterior por generar bloques o pedazos más pequeños. Frecuentemente, el daño por fatiga es un signo de que el pavimento ha sobrepasado el número de repeticiones de carga para el cual fue diseñado y en este caso la estructura necesitará una rehabilitación. Las consideraciones para prevenir la rotura por fatiga podrían ser una estimación adecuada del número de repeticiones de carga, evitar el humedecimiento de la subrasante, utilizar pavimentos más gruesos, mezclas asfálticas elásticas que soporten las deflexiones normales, entre otros (Corros et al., 2009) (Anguas et al., 2002).



*Figura 3.3. Fisuración por fatiga en huella derecha de calzada. (Fuente propia)*

- c) En los casos de refuerzo de pavimentos utilizando mezclas asfálticas, es posible la aparición de grietas como reflejo de las juntas o de retracción de capas inferiores. Este tipo se conoce como fisuras por reflexión, Figura 3.4.



*Figura 3.4. Fisuración por reflejo de fisuras. (Martínez et al., 2018)*

- d) Algunas fisuras se generan a los costados de los pavimentos, son paralelos a ellos y generalmente están a una distancia entre 0,30 y 0,60 m del borde exterior, a éstos se los denomina fisuras de borde. Este daño puede originarse por debilitamiento de la base o de la subrasante en sectores próximos al borde del pavimento, por falta de soporte lateral, entre otros. Este se acelera por el efecto de las cargas de tránsito, Figura 3.5.



*Figura 3.5. Fisuras de borde. (Corros et al., 2009)*

- e) Existen otros tipos de fisuras como las longitudinales y transversales. Las primeras son paralelas al eje del pavimento y pueden ser causadas por una junta de carril del pavimento pobremente construida, contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al envejecimiento del asfalto. Las transversales se extienden a través del pavimento en ángulos aproximadamente rectos al eje del mismo, Figura 3.6.



*Figura 3.6. Fisura longitudinal. (Corros et al., 2009)*

- f) La reparación de baches o de intervenciones como zanjas en el pavimento, es un área en la cual ha sido reemplazada con material nuevo para reparar el pavimento existente. Esta zona se considera un defecto, ya que la discontinuidad estructural y de calidad de materiales entre lo existente y lo nuevo colocado genera un comportamiento diferente. Esto se traduce en tensiones y deformaciones distintas en la unión entre ambas zonas, lo que podría inducir concentraciones de tensiones en capas de rehabilitación colocadas sobre ellos, y con ello la iniciación de fisuras, Figura 3.7.



Figura 3.7. Zona reparada en la estructura del pavimento. (Fuente propia)

### 3.2 Rehabilitación de pavimentos

Las operaciones más habituales de conservación, que se realizan con frecuencia en los pavimentos asfálticos son los bacheos, reparaciones de bordes, sellado de fisuras y juntas, eliminación de exudación y fresados. En cuanto a las rehabilitaciones, se recurre a ellas cuando la sollicitación del tránsito y las acciones del clima han provocado, una disminución que es observable de las características iniciales del pavimento o cuando se desea satisfacer nuevas sollicitaciones que no han sido contempladas con anterioridad. En algunas situaciones, sólo el aumento de espesor colocando una nueva capa asfáltica presenta el inconveniente de que los deterioros de las que se encuentran por debajo terminan reflejándose en la superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzos. (Rivera, 2019)

Por lo anterior es posible mencionar que los pavimentos a ser rehabilitados pueden clasificarse según su finalidad, en superficiales y estructurales (Soto Sánchez, 2006).

Las de superficie tienen por objeto conservar o mejorar las características funcionales, seguridad, comodidad, etc., y la protección del conjunto del camino el aumento de la durabilidad, impermeabilidad, uniformidad, aspecto, etc. Es decir, se realizan cuando el estado superficial del pavimento presente deficiencias que afectan, atentan o comprometen alguna de las características recién mencionadas.

En cuanto a las estructurales, tienen por objeto aumentar significativamente la capacidad de las mismas, adecuándola a las acciones del tránsito previsto durante su período de servicio. Es decir, la necesidad de realizarla se plantea si se produce

agotamiento estructural de la vía, un crecimiento importante de la intensidad de tránsito pesado o gastos excesivos de conservación (Alonso Burgos, 2002).

### 3.2.1. Alternativas de rehabilitación estructural

En aquellas situaciones en la que se ha recurrido a la colocación de una capa de rehabilitación las opciones puede ser: luego de eliminar la capa deteriorada, sobre la capa deteriorada y reciclando dicha capa, como se muestran en las Figura 3.8 a, b y c.

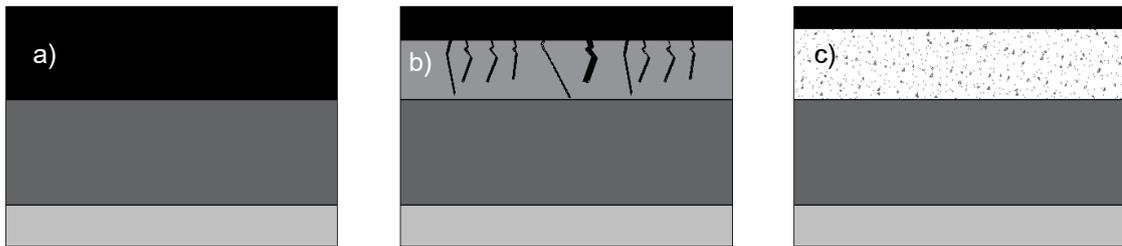


Figura 3.8. Esquemas de rehabilitaciones. a) nueva capa luego de eliminar la deteriorada. b) nueva capa sobre la deteriorada. c) reciclado. (Fuente propia)

En los casos donde se realice la colocación de una nueva capa sobre una fisurada, existen tratamientos complementarios con el objetivo de disminuir las tensiones, absorbiendo las deformaciones que producen la presencia de las fisuras, que se generan por la sollicitación del pasaje de la carga. Estos tratamientos pueden ser la colocación de una base granular, una mezcla asfáltica, geosintéticos, entre otros, ver Figura 3.9 a, b y c respectivamente.



Figura 3.9. Esquema capas intermedias. a) base granular. b) capa. c) geosintético. (Rivera, 2021)

### 3.2.2. Capas intermedias como retardo de fisuras reflejas

Una capa que actúe como elemento atenuador de fisuración refleja debe ser flexible y deformable ante sollicitaciones lentas por efecto térmico, también ser rígida para soportar las sollicitaciones rápidas del tránsito, además poseer buena adherencia con la capa de apoyo, experimentar reducidas deformaciones para no afectar por fatiga a la capa que sustenta, ser resistente al ahuellamiento y mantener la impermeabilidad. (Moreno, 2010).

Los diversos sistemas pueden ser clasificados en función de la naturaleza de la capa intermedia (Rodríguez, 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.
- Capa de alivio de fisuras: es aquella 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.

El tipo de capa intermedia utilizada, determinará diferentes comportamientos en la propagación de fisuras, Figura 3.10, 3.11 y 3.12.

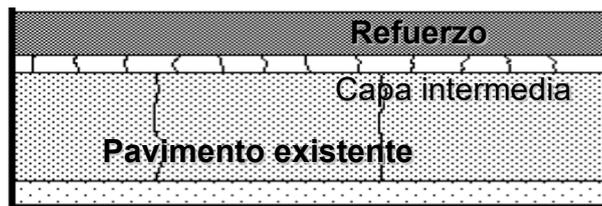


Figura 3.10. Reflejo en varias micro fisuras. (Delbono, 2014)

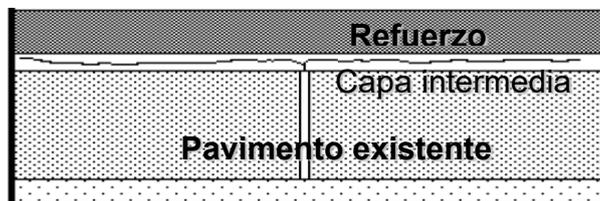


Figura 3.11. Redireccionamiento de la fisura. (Delbono, 2014)

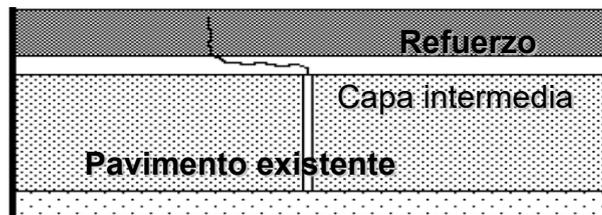


Figura 3.12. Redireccionado de la fisura y atraso de la reflexión. (Delbono, 2014)

Es importante mencionar que un sistema intermedio entre capas, dependiendo de material, granulometría, ligante, etc., puede contribuir en dar un pequeño aporte estructural. Es decir que, su sola presencia no se traduce en un refuerzo estructural y que la resistencia a la propagación de la fisura envuelve todos los componentes del pavimento: capa de refuerzo; capa intermedia, 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. (Delbono, 2014)

El deterioro prematuro de los pavimentos debido a la aparición de fisuras que se reflejan de capas inferiores suele ser uno de los problemas frecuentes en las tareas de rehabilitación. Mejorar el desempeño y durabilidad de las capas de refuerzos, retrasando la aparición de fisuras, contribuye a prolongar la vida útil de dichas estructuras. Esto se ha tratado estudiando diferentes alternativas tecnológicas, considerando distintos materiales interpuestos entre las fisuras y las nuevas capas asfálticas colocadas. Por ello, considerando lo mencionado en rehabilitación estructural de colocar una capa sobre otra fisurada y utilizar una capa intermedia como retardo de fisuras reflejas, es lo que ha motivado el desarrollo de la presente tesis. Es por todo esto que, en la búsqueda de nuevos materiales que sean capaz de aportar a la situación mencionada y analizar alternativas de mayor reúso de (NFU), se ha evaluado distintos tipos de mezclas, elaboradas con asfaltos modificados con alta tasa de NFU.

### **3.2.3. Adherencia entre capas**

Los movimientos relativos entre las capas que componen los sistemas de pavimentos pueden originar fisuras. Esto puede ser provocado por una baja o nula adherencia con la carpeta de rodamiento provocando una fisuración temprana ante las solicitaciones del tránsito (Maroni, 1993). Esta deficiente unión genera en el espesor total del pavimento una mala distribución de tensiones. En caso contrario toda la estructura del pavimento se comportará como una capa monolítica.

El concepto de sistema multicapa, sometido a una sollicitación de flexión, puede asimilarse al de una viga multilaminada (Ricci, 2011), donde su resistencia se incrementa en función de su altura, considerando una adherencia total entre sus partes componentes. Existen estudios que, mediante modelación, mencionan que trabajando monolíticamente se logra mayor capacidad de toda la estructura.

### **3.2.4. Adherencia en la interfase**

La interfase es una superficie que presenta una discontinuidad en uno o más parámetros de los materiales de las diferentes capas que componen el sistema en estudio (Alvarez, 2005).

La norma 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. En un sentido práctico, suele utilizarse como tal aquella zona dentro de los 10 mm alrededor del plano de unión entre sí (Rivera, 2019).

En los refuerzos de pavimentos asfálticos que están adheridos, es necesario realizar un riego de liga. Este consiste en la aplicación de emulsión asfáltica sobre la superficie existente, con el objetivo de generar la unión con la capa de revestimiento asfáltica en caliente que se va a colocar posteriormente, para lograr una adecuada interfase.

La adherencia entre ambas capas es de elevada importancia ya que posibilita un adecuado comportamiento de la estructura. En caso de no lograr esta última, implicaría una inadecuada transmisión de las tensiones que actúan en el pavimento a la capa subyacente. Esto generaría un incremento de las tensiones a tracción en las capas inferiores de la carpeta asfáltica y su fisuración prematura por fatiga. (Rivera, 2019). Una inadecuada adherencia en la interfase, incrementa las tensiones y deformaciones generadas por el efecto del tránsito y en consecuencia reduce la vida útil del pavimento (Montestruque et al., 2015).

Los requisitos esenciales para los riegos de liga, son que deben ser finos, generar una cobertura uniforme de la superficie y deben cortar o curar antes que la capa de refuerzo sea colocada (Bianchetto, 2017; Rivera, 2019).

### **3.2.5. Riego de adherencia con emulsiones asfálticas**

Una emulsión puede ser definida como una mezcla de ligante asfáltico con agua que contiene pequeñas cantidades de un agente emulsificante. Es un sistema heterogéneo que contiene dos fases, la discontinua que está constituida por pequeños glóbulos de asfalto y la continua que es el agua. El tipo de emulsificante que se utilice define si se obtendrán del tipo aniónicas o catiónicas.

El signo de la carga de las gotas de asfalto y la reactividad permite clasificar a las emulsiones. Las catiónicas son las que las gotas se cargan positivamente y las que se cargan negativamente se llaman aniónicas. Asimismo, existen otros tipos de emulsificantes que permiten generar distintas emulsiones, pero puede tener un uso más reducido.

Por otro lado, se las puede clasificar por la velocidad de rotura. El asfalto que contiene la emulsión deberá volver a su estado de una película continua con el fin de actuar como ligante cuando se la emplea como riego de adherencia. En la rotura ocurren procesos de floculación, coalescencia y eliminación del agua. La velocidad en los que ocurren éstos, dependen de la reactividad de la emulsión, de los agregados y de las condiciones climáticas como la temperatura, humedad y viento. Actualmente a las emulsiones se las puede clasificar por su velocidad de rotura en: aniónicas rápida, media y lenta; y las catiónicas rápidas, media, lenta y superestables. La norma IRAM 6691 (2008) también considera las clasificaciones de: imprimación, rotura controlada y reciclado en frío. (Rivera, 2019)

La rotura de una emulsión es un proceso complejo, donde intervienen distintos factores en simultáneo. Existen dos mecanismos fundamentales en la rotura de éstas, los cuales producen la separación en fases y la formación de la película continua de asfalto sobre los agregados. Estos son la evaporación y la reacción fisicoquímica entre el emulsificante y la superficie del agregado. (Ricci, 2011)

El factor más importante en la generación de una adherencia adecuada entre la superficie del pavimento existente y la nueva capa colocada sobre aquel, es la cantidad de ligante asfáltico residual que tendrá disponible la emulsión a utilizar. Por esto, la dotación a utilizar como riego debe ser en función de cantidades recomendadas y especificaciones técnicas. Asimismo, se debe tener en cuenta el tipo de riego que se está por realizar entre los que normalmente se realizan en las obras viales tales como el paliativo de polvo, de curado, de imprimación y el de liga o adherencia. Cada uno de ellos presenta sus particularidades, recomendaciones de ejecución, dotaciones, etc. El caso que corresponde, en esta investigación, es la de adherencia y para ella se ha considerado el pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas de la Dirección Nacional de Vialidad Argentina. (DNV, 2017)

Las emulsiones asfálticas modificadas son las que el asfalto residual presenta características reológicas y mecánicas notablemente mejoradas respecto al asfalto base, debido a la incorporación de sustancias macromoleculares, en general polímeros termoplásticos, en la fase acuosa previa a la emulsificación. Además, es posible obtener emulsiones a partir de ligantes modificados.

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. (Delbono, 2014)

La norma IRAM 6698 (2006), 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, que aporta a la elección de la misma.

### 3.2.6. Emulsión utilizada en la tesis

La colocación de una carpeta de rodamiento es una tarea que se realiza a posterior de realizar el riego de adherencia. Por esto, las emulsiones de rotura rápida son las que permiten minimizar los tiempos entre la construcción o reparación de una base, colocación de una capa para retardo de fisuras y de carpetas de rehabilitación.

Se ha considerado una emulsión modificada de corte rápido justificada por lo expuesto anteriormente, en búsqueda de mejores características y comportamientos al ser aplicada entre capas, tiempos de ejecución entre ellas y recomendación de la IRAM 6698 (2006), Figura 3.13. En cuanto a la dotación, en el mencionado pliego anterior de riegos de liga (DNV), en el apartado 05, presenta las recomendaciones de para las mismas, donde establece un rango de 0,25 a 0,40 kg/m<sup>2</sup> de asfalto residual.



*Figura 3.13. Emulsión utilizada en la experiencia. (Fuente propia)*

En la Tabla 3.1 se muestra la caracterización de dicha emulsión (E. mod.) otorgada por el fabricante, que de acuerdo a las exigencias de la IRAM 6698 (2006) se clasifica como de rotura rápida CRR 0m.

*Tabla 3.1. Especificaciones emulsión utilizada y exigencia de IRAM 6698 (2006).  
(Fuente proveedor).*

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>E. mod.</b>	<b>Exigencia</b>	<b>Norma</b>
Residuo asfáltico	[%]	63	Mín. 57	IRAM 6719
Hidrocarburos destilados	[%]	2	Máx. 3	IRAM 6717
Residuo sobre malla 20	[%]	0,08	Máx. 0,1	IRAM 6691
Recubrimiento y resist. al agua		83	Mín. 80	IRAM 6691
Carga de la partícula	Positiva		Positiva	IRAM 6690

### **3.3 Formación y propagación de fisuras a la capa de rodadura**

La reflexión de fisura consiste en el ascenso de fisuras existentes en capas inferiores, a través de las diferentes carpetas de mezclas colocadas sobre ellas hasta llegar a la superficie. Es decir, en algunos casos genera una copia, calcado o mapeado prácticamente igual en la carpeta de rodadura, a las fisuras que se encontraban por debajo. Esto se debe a diferentes situaciones, combinaciones de solicitaciones y movimientos en cada una de las fisuras, dependiendo del tipo de fisura y la causa que la haya generado. Es decir, podrá encontrarse desplazamientos horizontales, verticales o combinados con o sin ingreso de agua a las capas inferiores dependiendo del estado de avance del deterioro. Esto provocaría que la solicitación sea del tipo flexión, corte o combinación de ellas. La eliminación completa de la propagación de fisura no es posible debido que es un proceso inherente al deterioro natural del pavimento. Esto ha llevado a estudiar y evaluar durante muchos años como retardar o retrasar la velocidad en que dichas fisuras ascienden a la superficie, a través de diferentes alternativas tecnológicas, entre las que se pueden mencionar, mezclas asfálticas, geotextiles, entre otras.

El fenómeno de reflexión es uno de los factores más influyentes en el deterioro de los pavimentos con mezclas asfálticas. Estas ocasionan varios problemas, siendo algunos:

- Entrada del agua al interior del pavimento, causando pérdida de capacidad de soporte de la estructura.
- Degradación del pavimento en las proximidades de la fisura.
- Deterioro de la superficie de rodadura, disminuyendo la comodidad seguridad de los usuarios.

La formación y propagación de fisuras en los pavimentos ocurre por diferentes solicitaciones el tránsito, clima, fundación, etc., y mecanismos diversos de

dilatación, contracción, corte, etc. Por lo general, se manifiesta en tres etapas (Molina, 2008):

- **Iniciación:** se genera en el fondo de la capa bituminosa y se produce por la presencia o aparición de un defecto o de una discontinuidad en la capa subyacente. La velocidad de esta fase es función de la concentración de esfuerzos, del comportamiento de la capa inferior y de la interfaz.
- **Propagación:** se caracteriza por un desarrollo lento y gradual a través del espesor de las capas inferiores, dependiendo del grosor y la rigidez de la capa superior.
- **Ruptura de la capa:** es la fase final, en la cual se ven evidenciadas las fisuras en la superficie del pavimento.

El aumento del espesor de la capa de refuerzo provocará un mayor tiempo en que la fisura aparezca en la superficie. También las características de la mezcla con las que se elaboren las capas, influirá en la velocidad de su propagación.

El mecanismo para explicar el progreso de la fisura refleja en la estructura de un pavimento puede ser dividido en (Franken et al., 2005; Delbono, 2014), Figura 3.14:

- **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.

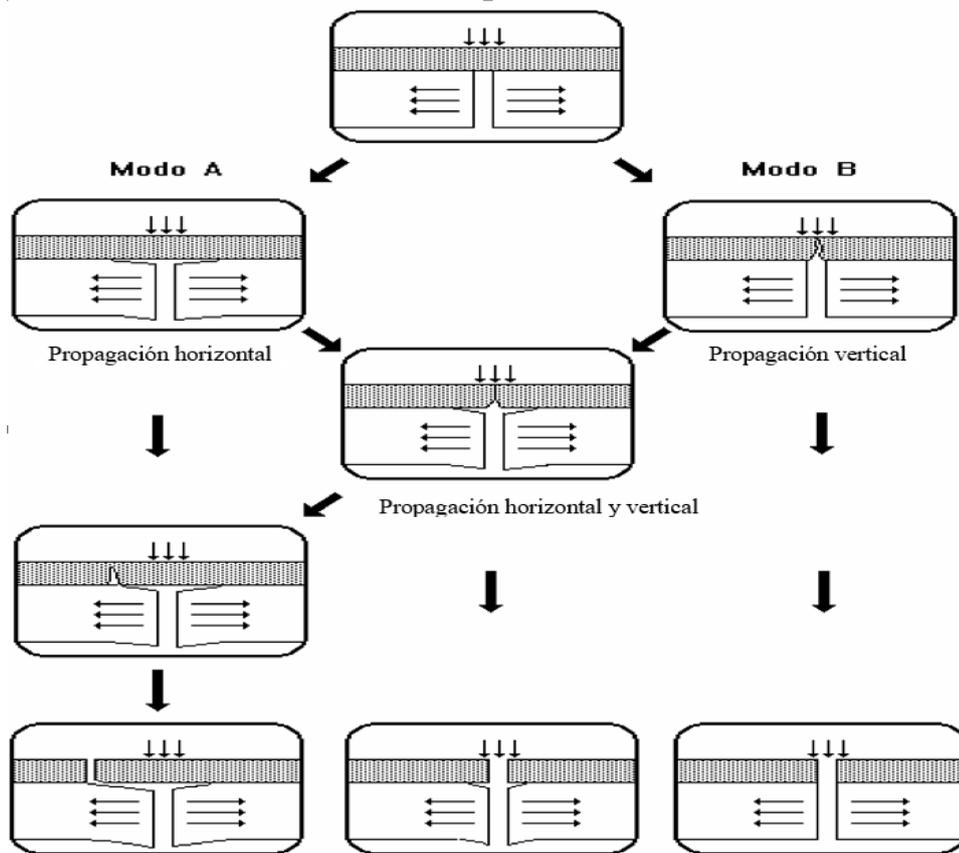


Figura 3.14 Mecanismo de propagación de fisura. (Franken et al., 2005; Delbono, 2014)

### 3.3.1. Modos de generación de una fisura

El fenómeno de reflexión de una fisura es causado por tensiones de tracción y de corte en la capa asfáltica producida por los movimientos horizontales y verticales de los bordes de las fisuras y juntas existentes en la capa inmediatamente inferior. Dependiendo de la dirección en que actúa el esfuerzo exterior, del plano y el frente de la fisura se definen tres modos de rotura (Montestruque, 2002; Medina et al., 2005; Molina, 2008), Figura 3.15:

- 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: desgarramiento.

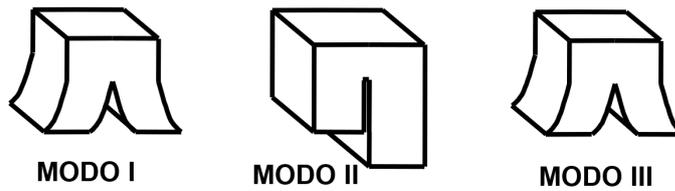


Figura 3.15. Modos en que se produce la fisura. (Delbono, 2014)

El tránsito pesado induce movimientos, en donde su amplitud depende de factores tales como frecuencia y peso de los vehículos, deflexión de la estructura y la capacidad que tenga ésta de transmitir la carga de un lado a otro de la junta o fisura.

La acción del tránsito puede inducir cualquiera de los tipos de modo anteriores, según la posición que se tenga en relación a los vehículos y a la orientación de juntas o fisuras al eje de la vía. (Molina, 2008)

### 3.3.2. Forma en que se produce la reflexión de fisura

La repetición de las cargas de tránsito sobre la fisura del pavimento antiguo, genera tres pulsos de alta concentración de tensiones que ocurren en la extremidad de la fisura (Montestruque, 2002), la cual progresa a través de la capa de refuerzo, como se indica en la Figura 3.16 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.

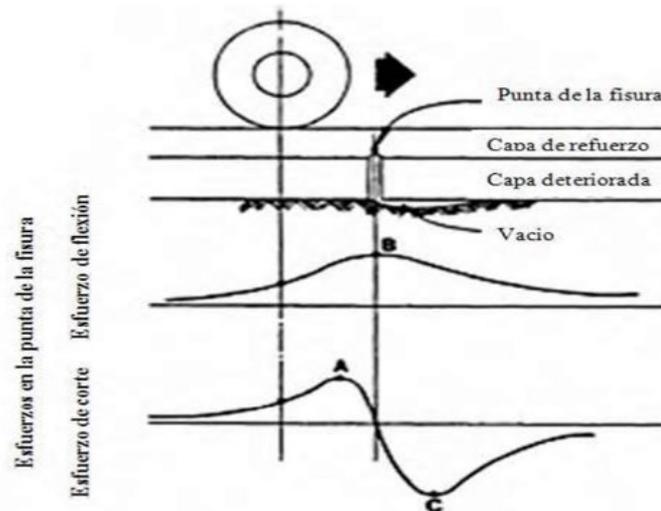


Figura 3.16 Tensiones en la extremidad de la fisura con el paso de una carga de rueda. (Delbono, 2014)

Estos tres pulsos de tensiones ocurren en un corto lapso de tiempo, del orden de 0,1 segundos. Una carga aplicada sobre una fisura o junta existente debajo de una capa asfáltica, tal como se mencionó, creará efectos de flexión y cortantes sobre ella, causando una relación directa entre estos efectos y la propagación de la fisura, Figura 3.17.



Figura 3.17. Solicitaciones experimentadas por la estructura del pavimento. (Molina, 2008)

Las variaciones de temperatura en la capa de refuerzo pueden contribuir también a la reflexión de fisuras. La variación de ésta, 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 (Delbono, 2014).

### 3.3.3. Método analítico de propagación de fisuras

La comprensión de los aspectos del fenómeno de reflexión en pavimentos, para la propagación de fisuras, puede ser recurriendo a la ley empírica de Paris (Paris et al., 1963). La misma está dada por:

$$\frac{dc}{dN} = AK^n$$

Donde:

- $dc/dN$ : aumento de la longitud de la fisura por ciclo de carga
- $K$ : factor de intensidad que describe el estado de esfuerzo en la punta de las fisuras.
- $A$  y  $n$ : constantes que indican las propiedades de la fractura del material.

Una referencia particular merece lo publicado por Montestruque (2002), por su vinculación con esta tesis, sobre la valoración de la ley de Paris realizado en las mezclas con asfalto con NFU. En el mismo menciona que entre los principales beneficios que se obtienen en la mezcla por la inclusión del caucho se pueden citar:

- Mayor durabilidad y flexibilidad, con mayor resistencia a la reflexión de grietas
- Mayor resistencia a la formación de huellas de ruedas
- Mayor resistencia al agrietamiento térmico
- Mayor resistencia al envejecimiento por oxidación en aproximadamente tres veces en comparación con el hormigón asfáltico convencional, debido al alto porcentaje carbón negro y antioxidantes en neumáticos
- Reducción de ruido.

Propiedades de Fatiga: una caracterización mecanicista, a través de los principios de la mecánica de fractura, permite predecir la vida a fatiga considerando la progresión de la fisura, dada por La ley de París.

La fatiga por corte y las propiedades de fractura de mezclas asfálticas con caucho, presentan los siguientes resultados:

- Para mezclas convencionales:  
 $A = 3,44 \times 10^{-6}$   
 $n = 2,32$
- Para mezclas con asfalto con NFU  
 $A = 2,86 \times 10^{-6}$   
 $n = 1,94$

De las expresiones anteriores, la relación de crecimiento de grietas para mezclas de asfalto y caucho disminuye en un 50 – 150 % en comparación con la mezcla convencional, los valores de A, n y K disminuyen agregando caucho a la mezcla. (Montestruque, 2002)

### **3.4 Modelos de análisis de propagación de fisuras**

La respuesta de una estructura de un pavimento dependerá de la combinación de las cargas, factores ambientales, espesores y propiedades de los materiales.

Es por todo esto que valorar el comportamiento bajo condiciones reales de sollicitación, mediante un equipamiento sencillo no resulta tan fácil.

El equipamiento de laboratorio que presenta la posibilidad de sollicitación dinámica con cierta frecuencia, constituye una herramienta que podría utilizarse para caracterizar el comportamiento. Aquellos procedimientos asociados a ensayos que permitan simular las condiciones de campo, serán los más representativos. Esto posibilitará validar el desempeño mediante la comparación entre diferentes mezclas utilizadas como retardo de fisuras reflejas.

#### **3.4.1. Equipos y ensayos para valorar el crecimiento de fisuras**

El monitoreo del progreso de una fisura en campo se complica por las variables como la temperatura, carga, velocidad de propagación. Por esto los ensayos y metodologías que permitan evaluarlo de manera acelerada son más frecuentes debido a que es posible realizarlo en un menor tiempo. Asimismo, se posicionan como una importante herramienta que posibilita la verificación y valoración de las respuestas de un pavimento.

#### **Ensayos de rueda de carga**

Los equipos de simulación de rueda cargada han evolucionado y desarrollados

desde hace muchos años. En este sentido se muestran y describen los principales.

### Wheel Tracking Test (WRC)

El laboratorio de carreteras de la Universidad Politécnica de Madrid desarrolló esta metodología. Consiste en aplicar una tensión de tracción horizontal a razón de 0,6 mm/h, cuenta con sistema de placas deslizantes que posibilita una deflexión, una frecuencia de 42 ciclos por minuto y se basa en la norma británica BS 598-110 (1998), Figura 3.18.

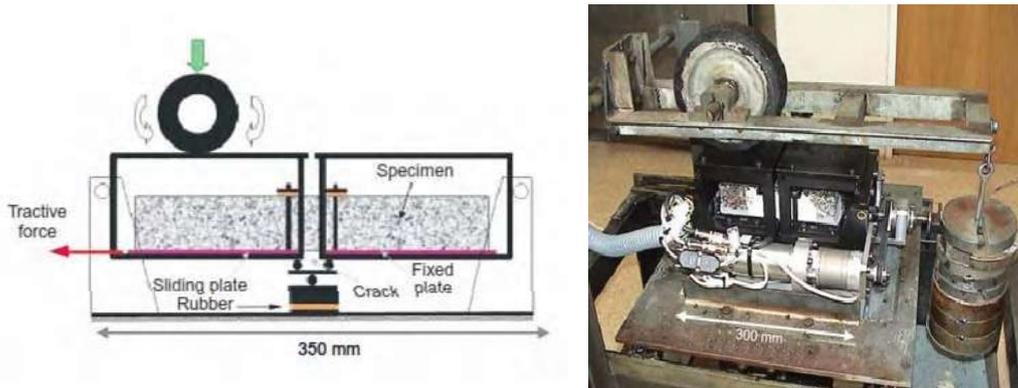


Figura 3.18. Wheel Tracking Test (WRC). (Delbono, 2014)

### Probador Pavement Rutting (LCPC)

Este se utiliza para medir el ahuellamiento de mezclas asfálticas mediante una rueda con su neumático, con una carga de 5 kN y una frecuencia 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 3.19.



Figura 3.19. Probador Pavement Rutting (LCPC). (Delbono, 2014)

### Hamburgo Wheel Tracking Device (HWTD)

El equipo mide el ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad de una mezcla asfáltica haciendo rodar una rueda de acero sobre su superficie que se sumerge

en agua caliente. Posee una frecuencia de 53 ciclos/min y una carga de 705 N. El equipo puede ser adaptado para estudiar diferentes sistemas para retardo de fisuras reflejas, Figura 3.20.



Figura 3.20. Hamburgo Wheel Tracking Device (HWTM). (Delbono, 2014)

### University College of Dublin (UCD)

Este método desarrollado por Gibney y otros (2002) en Irlanda, permite analizar la progresión de fisuras ascendentes y descendentes, en posición de flexión y de corte. La muestra se coloca sobre una espuma que simula la base débil y en los extremos dos apoyos de madera. Presenta una frecuencia de 21 ciclos/min, una carga de 520 N y se basa en la norma británica BS 598 (1998), Figura 3.21.

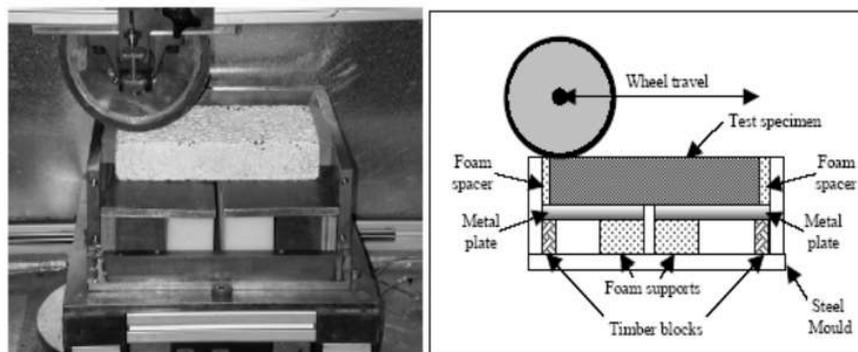


Figura 3.21. University College of Dublin (UCD). (Delbono, 2014)

### Wheel Tracking Test (WTT)

El ensayo consiste en medir la deformación plástica permanente, el ahuellamiento, al aplicar una carga mediante el paso de una rueda, con cierta frecuencia, nivel de carga, a una temperatura definida de ensayo, Figura 3.22. y se basa en el método UNE EN 12697-22 (2008). Existen numerosos equipos de estas características y pueden ser adaptados para estudiar el fenómeno de reflejo de fisuras en los pavimentos.

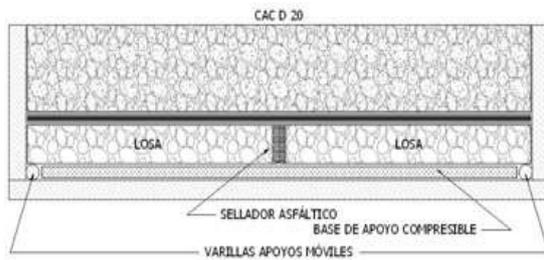


Figura 3.22. Wheel Tracking Test (WTT). (Delbono, 2014)

### Ensayos de flexión con carga cíclica

Los equipos de simulación para este tipo de sollicitación han evolucionado y desarrollados desde hace muchos años, al igual que los de rueda cargada. En este sentido se muestran y describen los principales.

#### Equipo de carga cíclica (ECC)

En esta metodología se somete a cargas cíclicas, en búsqueda de simular el efecto del tránsito, a una viga que descansa sobre una goma que representa las características de la base. Figura 3.23. La carga es aplicada en el centro de la probeta con una carga máxima de 8,3 kN y una frecuencia de 0,2 Hz.

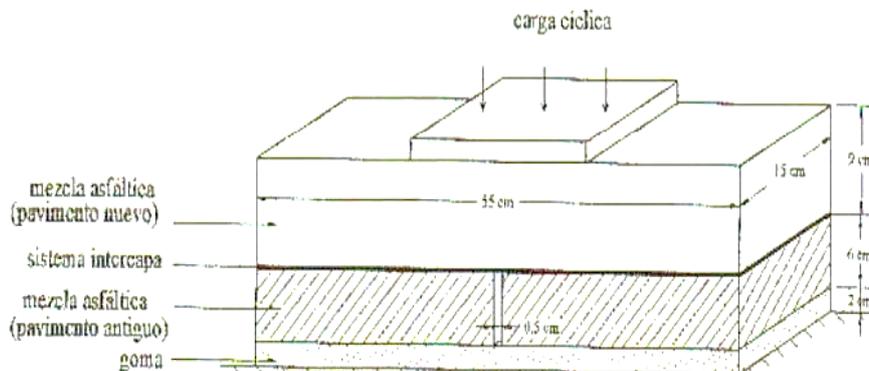


Figura 3.23. Equipo de carga cíclica (ECC). (Delbono, 2014)

#### Equipo LRPC D'AUTUN

Desarrollado por el Laboratorio Regional Des Ponts et Chaussées D' Autun (LRPC D'AUTUN), utiliza una probeta de 500 x 110 mm sometida a dos sollicitaciones (tracción/flexión) a 5 °C de temperatura. Este realiza ciclos de tracción horizontal a una velocidad de 0,6 mm/hora y relajación que simulan la tracción y contracción térmica, Figura 3.24. 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 medición de las fisuras la realiza mediante sensores ubicados en los laterales de la probeta.

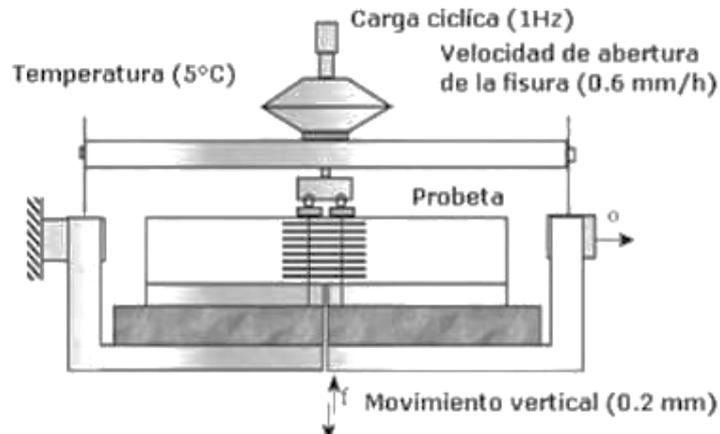


Figura 3.24. Equipo LRPC D'AUTUN. (Delbono, 2014)

### Equipo Test Set Up

Este sistema consiste en solicitar una probeta prismática elaborada en capas que representa la estructura de un pavimento. A la misma le aplica una carga dinámica, máxima de 6,79 kN, en el centro superior de la viga, a través de una placa circular con una frecuencia de 10 Hz simulando un tránsito a alta velocidad y a una temperatura de ensayo de 20 °C, Figura 3.25.



Figura 3.25. Equipo Test Set Up. (Delbono, 2014)

### Equipo de carga cíclica IMAE

El laboratorio vial IMAE (Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras) diseñó un equipo utilizando una probeta prismática realizando un análisis mediante elementos finitos. El ensayo se efectúa a flexión con carga pulsante aplicando 0,25 s de carga y 0,75 s de reposo y acondicionada a 10 °C, Figura 3.26.



Figura 3.26. Equipo de carga cíclica IMAE. (Martínez et al., 2008; Delbono, 2014)

### 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 para retardo de fisuras reflejas, Figura 3.27. El ensayo consiste en aplicar una carga de 10 Hz y una carga horizontal, se lleva a cabo a 5 °C con una carga vertical de 8,5 kN.

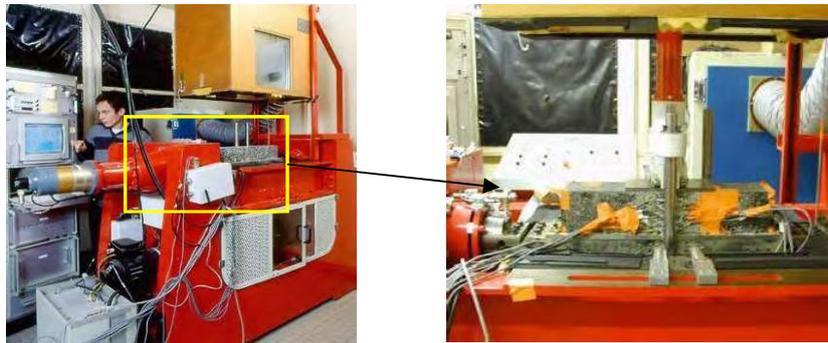


Figura 3.27. Equipo MEFISTO. (Delbono, 2014)

### Equipo MTS (Aeronautical Technological Institute)

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. Esta se encuentra simplemente apoyada, las cargas son variables entre 500 y 300 kN/m<sup>2</sup> y se aplican con una frecuencia de 20 Hz. Este equipo fue desarrollado en el 2003 por Aeronautical Technological Institute (ATI) de Brasil, Figura 3.28.



Figura 3.28. Equipo MTS. (Delbono, 2014)

### 3.4.2. Modelo de reflejo de fisuras utilizado para esta tesis

En este se implementa el equipo de módulo, descrito en la Norma UNE EN 12697-26 (2006), adaptándolo al que se denomina Módulo de Rigidez (MR), Figura 3.29, el cual posee la capacidad de seleccionar la carga de ensayo y que la misma sea aplicada con distintas frecuencias de repetición.

El dispositivo 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, es por ello que se ha denominado equipo de carga cíclica LEMaC. El mismo se encuentra en una cámara termostatazada que permite trabajar a temperaturas comprendidas entre 5 y 40 °C manteniendo acondicionadas las muestras.



Figura 3.29. Equipo por cargas repetidas implementado. (Fuente propia)

En función de la manera de la aplicación de las cargas de tipo dinámicas, se

constituye en una metodología que permite realizar dicha solicitud en todos los materiales y sistemas a evaluar. Es por esto y su disponibilidad en las instalaciones donde se desarrolla esta tesis, es que se ha adoptado dicho equipamiento y sistema de ensayo.

Las probetas utilizadas para la presente investigación, se realizaron conformándolas en tres capas de mezclas, como se puede ver en la Figura 3.30 a. En donde en la inferior se ubica la que representa a la carpeta deteriorada con fisuras preexistentes. En este sentido, Martínez y otros (2008), al emplear un modelo con una configuración de carga similar y una sola capa asfáltica sobre otra con una fisura previa, efectúan una estimación indirecta de la longitud de la fisura refleja. Esta estimación se basa en las propiedades de deformabilidad, suponiendo que el sistema se vuelve más deformable conforme avanza la fisura, realizando mediciones de su apertura mientras se desarrolla el ensayo. Sin embargo, no siendo esto último el objetivo de la tesis, en este caso se ha trabajado con una única fisura representada por una entalladura con dimensiones según Figura 3.30 b, realizada igual en todas las probetas ensayadas con la finalidad de realizar una comparación relativa entre las diferentes mezclas estudiadas. Esta última, es representada por la capa central que simula la de retardo de fisuras, elaboradas con diferentes mezclas con granulometrías y ligantes asfálticos a evaluar, esto se verá en el capítulo 5. Por último, la superior es la capa de rehabilitación, con una mezcla del tipo convencional, CAC D19 Concreto Asfáltico en Caliente Densa de la Dirección Nacional de Vialidad Argentina (2017), de la cual sus características también se mencionan en dicho capítulo.

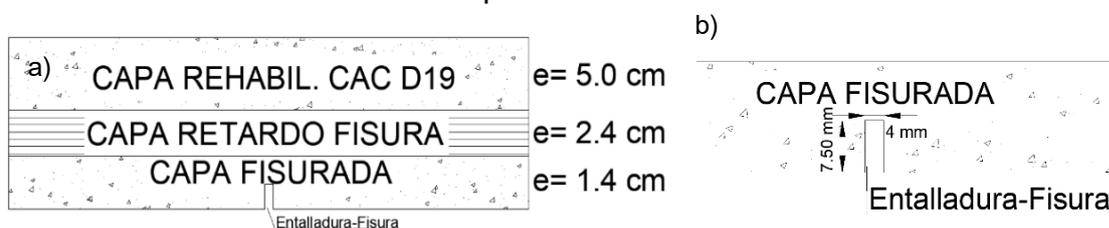


Figura 3.30. Esquemas. a) Probeta b) Detalle de entalladura. (Fuente propia)

La aplicación de la carga se realizó en posición de flexión cuando la rueda de un vehículo pasa sobre una fisura, para ello se colocó dos apoyos de tipo móviles, Figura 3.31. Esta solicitud es una de las que se encuentra sometida la mezcla de retardo de fisura en correspondencia con la junta o fisura generada.



Figura 3.31. Apoyos y aplicación de la carga en viga. (Fuente propia)

En síntesis, se puede mencionar que en todas las probetas se mantuvieron constantes la calidad de la capa superior y de la inferior. También, en esta última, la geometría de la entalladura, simulando una sola fisura y concentrando toda la energía en ella. Además, se ha considerado el inicio de misma cuando comienza en la capa intermedia y a partir de ese momento se han contabilizado los ciclos hasta la rotura. Asimismo, el sistema de sollicitación de carga y apoyos permite un movimiento vertical acelerando el deterioro, que en la rehabilitación de un pavimento estos serían minimizados por las tareas previas de reparaciones. Por otro lado, la capa intermedia es la que se consideró como variable, al ser elaboradas con diferentes mezclas, evaluando su desempeño.

### 3.4.3. Confección de probetas de la tesis

Las mismas se confeccionaron de manera similar a las empleadas para el ensayo WTT. Es decir, en forma general, se utilizaron los moldes de dicho equipo y para la compactación el equipo Roller Compact y luego fueron cortadas con aserradora, Figura 3.32 a, b y c.

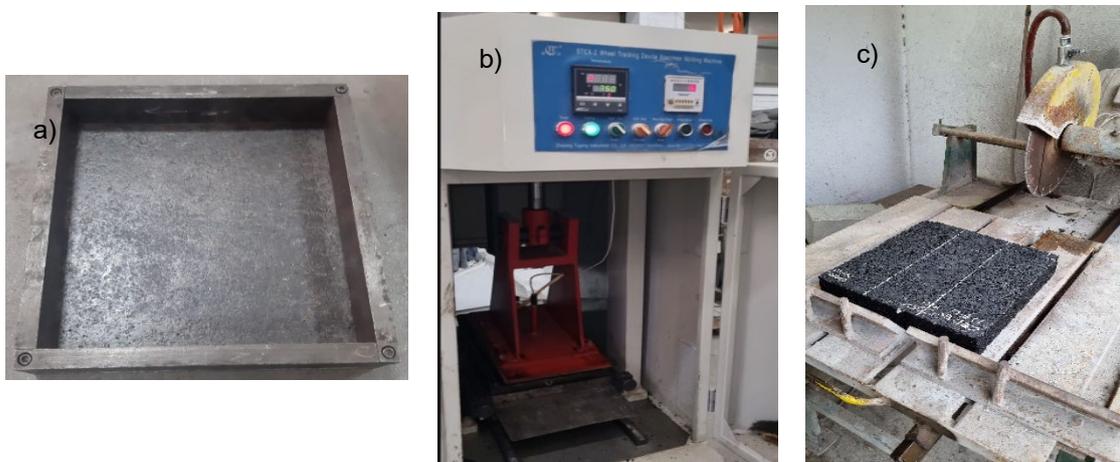
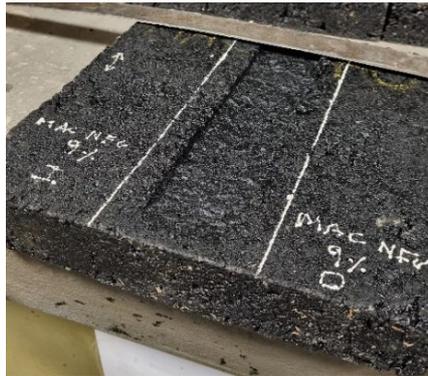


Figura 3.32. a) Molde de equipo WTT. b) Roller Compact para compactación de capas. c) Aserradora para corte de probetas. (Fuente propia)

En una primera etapa se procedió a ensayar a propagación de fisura los especímenes obtenidos a partir de cortar los laterales de las probetas ensayadas a WTT, ver Figura 3.33. Estas quedaron conformadas con una geometría de 30 cm de largo, 10 cm de ancho y 5 cm de altura. Esto se realizó, debido a que en el proceso de dosificación de las mezclas se fue midiendo el ahuellamiento. Por ello, al cortar los laterales se disponía de vigas de las dimensiones mencionadas que permitían ensayarlas en el modelo de reflejo de fisuras antes mencionado. Esto a los efectos de obtener una primera aproximación de la capacidad de resistir a la propagación de fisura de cada tipo de mezcla. También la verificación y puesta a punto del sistema de ensayo adoptado. Es decir, esta primera determinación permitió estimar una cantidad de ciclos de inicio de fisura y rotura de probeta, partiendo del análisis de la carga de sollicitación como se describe en el apartado 3.4.4. Siendo éstas últimas de una sola capa y de cada una de las mezclas estudiadas que conforman la capa intermedia de las probetas del modelo.



*Figura 3.33. Probeta posterior a ensayo de ahuellamiento del proceso de dosificación. Laterales marcados para aserrar. (Fuente propia)*

En una segunda etapa se conformaron las probetas del modelo como se mencionó en el apartado 3.4.2 “Modelo de reflejo de fisura utilizado para esta tesis”. La primera capa, la inferior, se colocó y compactó en el molde de WTT. Esto último se realizó con un martillo eléctrico, es un percutor que simula las condiciones mínimas de compactación, ver Figura 3.34, siendo la única que se compactó de esta manera. Esto se debió a la imposibilidad de realizarlo con el Roller Compac por la configuración de alturas de las diferentes capas, altura de molde y capacidad de dicho equipo. Esta es la que representa la capa deteriorada en el pavimento y para ello, una vez terminada toda la probeta del modelo, en ella se procedió a realizar una entalladura en la parte inferior con aserradora, Figura 3.32 c, representando a una fisura existente dentro del pavimento.



Figura 3.34. Compactación con percutor eléctrico de capa inferior. (Fuente propia)

Luego de una hora de enfriado, sobre ésta se coloca una emulsión del tipo corte rápido modificada, que se ha descrito antes en el apartado 3.2.6, como riego de adherencia. El mismo se colocó en la dotación adoptada de  $0,25 \text{ kg/m}^2$ , según el rango establecido el pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas (DNV, 2017), antes mencionado. Aplicándolo mediante pincel, hasta alcanzar la cantidad para la superficie de la misma y considerando el porcentaje de asfalto residual de la emulsión, como se observa en la Figura 3.35 a y b. El curado de la misma en campo es rápido, aunque dependerá de las particularidades del mismo y de las condiciones del entorno. En este sentido, Rivera (2019) menciona que es posible en análisis de laboratorio, estandarizar un lapso de curado si se utilizan estrategias a tales efectos (Rivera, 2019). Es por ello que para lograr este último y el corte de la emulsión se ha dejado la probeta, luego de aplicado el riego, en una estufa a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  durante una hora.



Figura 3.35. a) Aplicación de emulsión. b) Cantidad de emulsión colocada. (Fuente propia)

La segunda parte, la mezcla para retardo de fisuras a evaluar, fue colocada

inmediatamente después del curado antes mencionado y compactada con el equipo Roller Compact. Luego se prosiguió con el mismo procedimiento descrito en cuanto al enfriado, colocación y curado de la emulsión sobre esta última capa de mezcla, Figura 3.36.



Figura 3.36. Capas intermedias de retardo de fisuras de tres tipos de mezclas estudiadas. (Fuente propia)

En la tercera parte se colocó la mezcla convencional CAC D19, Concreto Asfáltico en Caliente Densa de la Dirección Nacional de Vialidad Argentina (2017), y compactó con el Roller Compact. Para ello, previamente se incorporó un sobre molde de 5 cm de altura que permitiera contener a la misma, Figura 3.37 a y b. Esto se debió a que los espesores de las dos primeras capas y un suplemento, colocado debajo de la primera para lograr alturas de trabajo del equipo de compactación, Figura 3.37 c, ocuparon los 5 cm de espesor del primer molde.



Figura 3.37. a) Colocación de sobre molde. b) Llenado de tercera capa. c) Compactación de última capa. (Fuente propia)

Los pasos mencionados anteriormente se resumen y se muestran en la Tabla 3.2.

*Tabla 3.2. Resumen de secuencia de pasos y capas asfálticas para confección de probetas. (Fuente propia)*

<b>Capa</b>	<b>Esp. [cm]</b>	<b>Ancho [cm]</b>	<b>Largo [cm]</b>	<b>Riego Emul.</b>	<b>Compact. [Equipo]</b>	<b>Enfriar [h]</b>	<b>Curar Emul. [h]</b>
Superior. Rehab.	5	30	30	no	Roller Compact	1	-
Media. Retardo de fisura	2,4	30	30	si	Roller Compact	1	1
Inferior. Fisurada	1,4	30	30	si	Martillo eléctrico	1	1

#### **3.4.4. Procedimiento de ensayo de la tesis**

El instrumental de laboratorio permite 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. Por otro lado, las capas asfálticas colocadas sobre una estructura de pavimento, encuentran en su parte inferior las restantes capas que componen a dicha estructura. Estas, trabajan solidariamente aportando una recuperación de la deformación por flexión en el período de reposos entre cargas sucesivas. El sistema y configuración de apoyo adoptado, resulta tener un comportamiento diferenciado de las condiciones reales en las que se encuentran las capas asfálticas en la obra. Sin embargo, éste fue utilizado ya que considerar un material para colocar en la parte inferior, que represente las características modulares de las capas inferiores del pavimento, entre otros parámetros, es de difícil materialización. Además, en caso de haber realizado esto último, en donde se representa una condición más real del funcionamiento de la estructura del pavimento, la evolución del deterioro y avance de la fisura sería más lento. Por ello, en la búsqueda de una situación comparativa relativa entre las distintas mezclas propuestas para evaluar y una velocidad más rápida de avance de la fisura, que fuera posible de registrar de manera presencial debido a la tecnología disponible, es que se optó por el sistema de una viga simplemente apoyada.

En cuanto a la elección de la carga de sollicitación, para la misma se realizó un análisis teórico. En éste, se consideró una estructura de pavimento compuesta por subrasante, subbase, base, capa asfáltica existente deteriorada y capa asfáltica de refuerzo. En éstas, se contempló sus espesores y módulos de rigidez, ver Figura 3.38, que surgieron de adoptar una estructura, que representara una situación de colocación de una capa de refuerzo sobre un paquete estructural de pobres

prestaciones. Estas fueron modeladas en el programa WESLEA, Waterways Experimental Station Layered Elastic Analysis, que permite calcular tensiones y deformaciones en pavimentos flexibles. Además, se consideró una carga de un eje, de 80 kN, de ruedas duales por lo que a cada una de ellas se las consideró con una carga de 20 kN. Posteriormente, se determinó la deformación específica en dos puntos en la fibra inferior de la capa asfáltica superior, ver Figura 3.38, siendo el punto 1 el que arrojó un mayor valor.

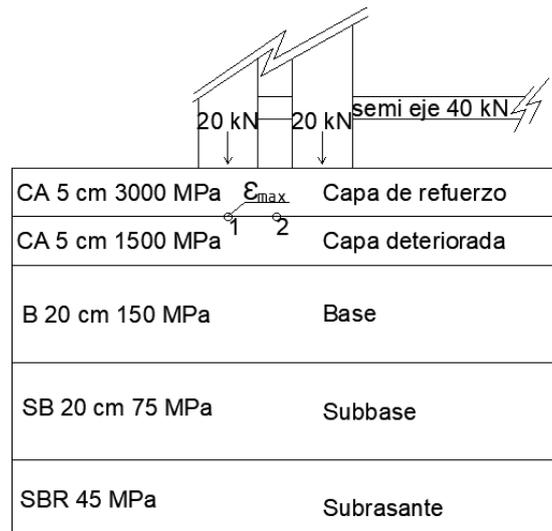


Figura 3.38. Esquema de estructura de pavimento adoptada para el análisis de la carga de sollicitación. (Fuente propia)

En el siguiente paso, se modeló una estructura de una capa asfáltica de 5 cm de espesor, siendo ésta la superficial, y una inferior con un módulo mínimo admitido por el software, Ver Figura 3.39, representando a las probetas utilizadas para puesta a punto del sistema, Figura 3.33. Esto a los efectos de determinar una carga, que generase una deformación específica y tensión, similar a la determinada en el punto 1 de la estructura modelada con todas las capas.

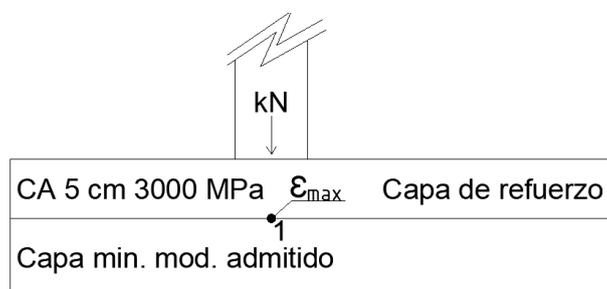


Figura 3.39. Esquema de modelización de probetas de 5 cm de espesor. (Fuente propia)

La carga que se obtuvo fue de 0,82 kN, con la que se procedió a ensayar solicitando una probeta de prueba. En este último, se realizaron las determinaciones de inicio de fisura y rotura de la misma, pero su realización

requirió de 13 horas. Por esto, se valoró que este tiempo de ensayo, en probetas de 5 cm de espesor, fue elevado y que sería aún mayor en las probetas de tres capas, Figura 3.30. Además, teniendo presente la bibliografía y las experiencias ya realizadas por Delbono (2014) utilizando una carga de sollicitación de 3,92 kN, se optó por elevar la carga a dicho valor, para disminuir el tiempo de ensayo. Asimismo, la temperatura de ensayo ha sido adoptada por ser representativa de la región central de país, ser considerada de diferentes metodologías de cálculo de pavimentos, utilizada en experiencias previas anteriores y que puede ser fácilmente obtenible y mantenida en el equipo utilizado. Es por todo esto que las condiciones de sollicitación se pueden resumir en:

Carga Máxima	$P = 3,92 \text{ kN (400 kg)}$
Frecuencia	$F = 0,33 \text{ Hz (Según curva UNE EN 12697-26)}$
Temperatura	$T = 25 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ °C}$
Distancia entre apoyos	$D = 250 \text{ mm}$

Por otro lado, realizar un análisis teórico o por modelización con elementos finitos con el fin de valorar cómo influyen las distintas variables analizadas, estimar la magnitud de tensiones alrededor de la punta de la fisura, entre otras, permitiría conocer las mismas y poder establecer relaciones con las determinaciones empíricas realizadas en las probetas de tres capas. En este sentido, Martínez y otros (2008) mencionan que es posible observar, en una modelización con similar sistema de sollicitación y de una sola capa asfáltica colocada sobre otra con fisura preexistente, que se genera una importante concentración de tensiones de tracción en coincidencia con el extremo de la pre-fisura en el primer ciclo, antes de que haya comenzado a reflejarse la misma. Además, esta tensión y su correspondiente deformación en este punto, actúan como disipadores del proceso de reflexión. En este sentido, Xu Xia y otros (2023), Alkaissi (2022) mencionan que alrededor de la punta de la fisura se producen elevadas tensiones. Por otro lado, Pengfei Liu (2019) menciona que podría existir una falta de homogeneidad de los materiales asfálticos que provocaría desviaciones entre algunas simulaciones y los ensayos, además que para la evaluación de la propagación de fisuras es necesario el factor de intensidad de tensión de la ley de Paris, entre otros. Por todo ello, en este estudio no se abordó una determinación analítica en tal sentido, debido a la

complejidad de análisis que surgen por la presencia de varias capas, diferentes tipos de mezclas a evaluar, la determinación de los parámetros que se requieren de ellas para llevar adelante dicha modelización, tal como el factor de intensidad  $K$  de la ley de Paris, entre otros. Estas determinaciones y valoraciones de estos parámetros, considerando que se está trabajando con materiales nuevos, como mezclas asfálticas de granulometría discontinua elaboradas con un asfalto con alta tasa de NFU, implicaría un estudio laborioso que se ha considerado para futuras investigaciones. En síntesis, en esta tesis, en el modelo de probeta descrito en el apartado 3.4.2, se buscó el objetivo de un análisis tecnológico y comparación relativa entre las diferentes mezclas estudiadas, quedando para un estudio posterior las determinaciones de los estados tensionales, apoyados en modelos numéricos o por análisis con elementos finitos.

### 3.5 Referencias

Alkaissi, A. (2022). Modelling Of Crack Propagation in Flexible Pavement Using X-FEM Method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 961. pp10.

Alonso Burgos, A. (2002). Rehabilitación de firmes. Orden Circular 9/2002. Instrucciones de construcción. Dirección General de Carreteras. Madrid, España. pp 94.

Álvarez Blanco, F. (2005). Materiales poliméricos y Compuestos. Tema 11 intercara fibra-matriz. Escuela de Minas de Oviedo. Laboratorio de Cementos. Principado de Asturias. 59 p.

Anguas, P., López, J., Martínez, J. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. Publicación 197. Instituto mexicano del transporte. Querétaro, México. ISSN 0188-7297. pp 224.

Bianchetto, H. (2017). "Procesos constructivos de mezclas asfálticas en caliente", Cátedra de Construcción de Carreteras, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Argentina.

BS 598-110 (1998). Methods of test for the determination of wheel-tracking rate and depth. British Standard. pp 14.

Campana, J. (2014). Diseño de pavimentos flexibles. Curso de posgrado. Especialización en ingeniería de caminos. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Escuela de Graduados Ingeniería de Caminos. Buenos Aires, Argentina.

Corros, M., Urbáez, E., Corredor, G. (2009). Manual de evaluación de pavimentos. Instituto Venezolano del Asfalto. Venezuela.

Delbono, L. (2014). Estudio de grillas poliméricas en sistemas anti-reflejo de fisuras bajo sollicitaciones dinámicas. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-38-7. pp 414.

DNV. (2017). Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas. Dirección Nacional de Vialidad, Argentina.

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.

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.

IRAM 45001. (1998). Adhesivos, definiciones. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 17.

IRAM 6691. (2008). Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas convencionales. Clasificación y requisitos. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 24.

IRAM 6698 [2006]. Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas modificadas. Clasificación y requisitos. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 20.

Maroni Laerte, G. (1993). El uso de Geotextiles en repavimentación asfáltica. Una experiencia reciente. Revista Carreteras. Edición N° 140, p. 57-66.

Martínez, F., Angelone, S. (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. ISBN 978-950-630-026-5.

Martinez, F., Páramo, J., Poncino, H. (2018). Tecnologías especiales en construcciones viales. Curso de posgrado. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura. Escuela de posgrado y educación continua. Rosario, Argentina.

Medina, J., Motta, L. (2005). Mecânica dos Pavimentos. Editado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). 2ª Edição. Rio de Janeiro.

Molina Bravo, L. (2008). Capas anti-reflecto de fisuras en pavimentos. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico mecánicas. Bucaramanga, Colombia. pp 194.

Montestruque Vilchez, G. (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. pp 137.

Montetrusque, M., Bernucci, L., Leite, F., Teoro Carmo, C.A. (2015) “Avaliação da adherencia de geogrelhas entre camadas asfálticas”, Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina.

Moreno, O. (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.

P. Paris y F. Erdogan, “A critical analysis of crack propagation laws,” J. Fluids Eng. (1963) vol. 85. pp. 528-533.

Pengfei Liu, Jian Chen, Guoyang Lu, Dawei Wang, Markus Oeser, Sabine Leischner (2019). Numerical Simulation of Crack Propagation in Flexible Asphalt Pavements Based on Cohesive Zone Model Developed from Asphalt Mixtures. Journal Materials. Vol. 12. ISSN 1996-1944. pp 13

Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo denso (2017). Dirección Nacional de Vialidad (DNV). Argentina.

Ricci, L. (2011). Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético. Tesis de maestría en ingeniería en transporte. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp 194.

Rivera, J. (2019). Estudio de riegos asfálticos de liga entre capas asfálticas para rehabilitación de pavimentos flexibles fresados. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-98-1. pp 235.

Rivera, J. (2021). Técnicas de conservación. Curso de posgrado. Maestría en ingeniería del transporte. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

Rodrigues, M. (2001). Modelos para Previsão do Desempenho de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários no Brasil. Relatório Final da Pesquisa CNPq, Processo No 301314/96-9.

Soto Sánchez, A. (2006). Vida útil. Necesidad de rehabilitación con soluciones innovadoras. Zaragoza, España.

UNE EN 12697-26 (2006). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Rigidez. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 26.

UNE-EN 12697-22 (2008). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Ensayo de rodadura. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 32.

Xu Xia, Dongdong Han, Yongli Zhao, Yichang Xie, Ziyue Zhou, Jinming Wang (2023). Investigation of asphalt pavement crack propagation based on micromechanical finite element: A case study. Journals Case Studies in Construction Materials. Vol. 19. ISSN 2214-5095. pp 19.

# Capítulo 04: Ligantes asfálticos con incorporación de alta tasa de NFU

---

## RESUMEN

El capítulo contiene una breve descripción de los ligantes asfálticos convencionales, los modificados con polímero virgen, la finalidad de la modificación de los asfaltos y los ensayos físicos que se han realizado en ellos. Luego la denominación de los ligantes base utilizados, los resultados de ensayos de caracterización de los mismos y las técnicas de incorporación de NFU en los asfaltos. Además, de esta última, la descripción de la que se ha utilizado en esta tesis y el recorrido de las normativas nacionales e internacionales de caracterización de éstos. También, se menciona el comportamiento reológico de los asfaltos, los ensayos oscilatorios y sus aplicaciones y determinaciones que se han abordado. Posteriormente, se presentan todas las dispersiones realizadas de los distintos ligantes base y porcentajes crecientes de NFU, sus denominaciones, ensayos de caracterización y la adopción de uno de ellos, en función de la normativa y experiencia realizada en laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid, para la elaboración de las mezclas que se desarrollan en el capítulo 5. Asimismo, se muestran los resultados de aplicaciones y determinaciones reológicas en los ligantes utilizados, que permitirían interpretar el mejor desempeño del adoptado con NFU antes mencionado, que se ha observado en las mezclas elaboradas con éste.

## 4.1 Asfaltos con incorporación de polvo de NFU

En los últimos años, se ha dedicado esfuerzo a mejorar las propiedades de los asfaltos mediante la investigación de la incorporación de diversos aditivos. Entre éstos, los neumáticos fuera de uso (NFU) han sido objeto de estudio, con tasas de alrededor del 8 %, según las experiencias anteriores realizadas por el autor de esta tesis. Con el objetivo de desarrollar asfaltos con notables características elásticas y resistencia a la fatiga, se ha explorado la viabilidad de incrementar significativamente los porcentajes de inclusión de NFU. Este enfoque tiene como fin formular mezclas asfálticas destinadas a retardar la formación de fisuras

reflejas.

En este contexto, se han empleado diversos tipos de asfaltos base, combinándolos con cantidades crecientes de polvo de NFU. La evaluación del comportamiento físico y reológico de cada combinación ha revelado cambios sustanciales en función del tipo de asfalto base y el porcentaje de polvo de NFU. Estos análisis ofrecen una visión más completa de cómo podría influir en las propiedades finales de las mezclas asfálticas.

#### **4.1.1. Ligantes base utilizados**

Los cementos asfálticos derivados del petróleo están compuestos por sustancias de alto peso molecular. Estas sustancias tienen una estructura extremadamente compleja, siendo hidrocarburos y compuestos heterocíclicos formados por carbono e hidrógeno, acompañados de pequeñas fracciones de nitrógeno, azufre y oxígeno, y a menudo de elementos como Ni, V, Fe, Mg, Cr, Ti, Co, entre otros. Geológicamente, se consideran depósitos antiguos que contienen productos con alto peso molecular, lo que sugiere que han experimentado progresivamente procesos de polimerización y condensación, dando lugar a la formación de una amplia variedad de compuestos de hidrocarburos, ya sea con estructura lineal, ramificada o cíclica, e incluso formando anillos aromáticos (Navarro, 2004).

Los ligantes asfálticos presentan diferentes comportamientos estructurales en función de (Agnusdei et al., 1999):

- Las características inherentes al material.
- Solicitación: carga del tránsito (tiempo de aplicación y frecuencia).
- Ambiental (temperatura, presencia de humedad, grado de precipitaciones).
- Otros agentes (combustible).

Es posible mencionar como ejemplo que, a cargas altas y a baja velocidad, como lo es el tránsito de camiones, combinado en un rango de temperatura de hasta 60 °C en el pavimento, el asfalto tiene un comportamiento viscoelástico. Es por esto, que los ensayos a realizar pretenden ser modelizaciones para cuantificar y calificar las características propias y las variaciones de las mismas frente al medio.

En la búsqueda de obtener un ligante modificado con polvo de NFU, que utilizado en la elaboración de mezclas de retardo de fisuras presenten una mejor respuesta a las sollicitaciones cíclicas dinámicas, se valoró la incorporación del mismo en distintos ligantes asfálticos bases. Estos han sido caracterizados de acuerdo a la norma IRAM 6835 (2020), Tabla 4.1. Además, su elección para ser considerado para la incorporación del NFU, surgió de sus disponibilidades de comercialización en el mercado de Argentina, de su potencial capacidad de receptor una mayor tasa de NFU y de la experiencia internacional (SIGNUS, 2017).

*Tabla 4.1. Clasificación de acuerdo con la viscosidad a 60 °C. (Fuente: IRAM 6835, 2020)*

Característica	Un.	Clase de asfalto										Mét. de ensayo
		CA-5		CA-10		CA-20		CA-30		CA-40		
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Vis. a 60 °C	[dPa.s]	400	800	800	1600	1600	2400	2400	3600	3600	4800	IRAM 6837
Vis a 135 °C	[mPa.s]	175	-	250	-	300	-	350	-	400	-	IRAM 6837
Índice de Penetración de Pfeiffer	-	-1,5	0,5	-1,5	0,5	-1,5	0,5	-1,5	0,5	-1,5	0,5	5.1
Ensayo de Oliensis	-	Negativo										IRAM 6594
Solub. en tricloro-etileno	[g/100g]	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-	5.2
Punto de inflam. Cleveland vaso abierto	[°C]	230	-	230	-	230	-	230	-	230	-	IRAM IAP A 6555
Ensayo sobre el residuo de pérdida por calentamiento – RTFOT												IRAM 6839
Índice de durabil.	-	-	3	-	3	-	3	-	3	-	3	5.3
Duct. del residuo a 25 °C, 5 cm/min	[cm]	50	-	50	-	75	-	100	-	-	-	IRAM 6579

Las elaboraciones de las diferentes mezclas estudiadas se han realizado, además de con asfalto con alta tasa de NFU, con asfalto modificado con polímero virgen con la finalidad de comparar su desempeño en dichas mezclas.

La modificación de los asfaltos con polímeros tiene como objetivos principales la obtención de ligantes con mayor viscosidad a altas temperaturas, con el fin de reducir las deformaciones permanentes o ahuellamiento. Este aumento de viscosidad contribuye a incrementar la rigidez del material. Por otro lado, busca disminuir el agrietamiento debido a efectos térmicos a bajas temperaturas y a la fatiga, mejorando la elasticidad. También, esta modificación permite obtener un ligante con propiedades adhesivas superiores y una mayor durabilidad, factores cruciales para las mezclas que estarán expuestas a estas sollicitaciones (Garnica, 2004).

Los polímeros pueden clasificarse de diversas maneras, siendo una de las

opciones la división en termoplásticos y termoestables, que se basa en su respuesta a los cambios de temperatura. Sin embargo, existen otras posibles clasificaciones según diferentes propiedades. Un ejemplo de ello son los elastómeros, que experimentan deformación al ser sometidos a fuerza y tienden a recuperar su forma original cuando cesa dicha fuerza. Además, dentro de las diversas categorías de polímeros, se encuentran distintos modificadores poliméricos que desempeñan roles específicos. Algunos modificadores poliméricos son:

- Homopolímeros: tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS, etc.).
- Elastómeros: aquellos a los cuales al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no sin volver a su longitud inicial al cesar el esfuerzo; tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Los aditivos contribuyen a mejorar la resistencia de las mezclas asfálticas frente a la deformación y a los esfuerzos repetidos, como los causados por la fatiga. Además, desempeñan un papel crucial al reducir el agrietamiento y la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Por lo general, estos aditivos se incorporan directamente al material asfáltico antes de mezclarlo con el agregado pétreo.

A pesar de que el asfalto representa una proporción minoritaria en la mezcla, sus características ejercen una influencia significativa en el comportamiento global. La naturaleza de la mezcla es el factor determinante en gran medida de la contribución que el ligante realiza al conjunto. En condiciones de servicio con elevadas temperaturas, existe la posibilidad de que el ligante se vuelva más blando, lo que facilitaría la deformación de la mezcla, especialmente en forma de ahuellamiento. Este riesgo se intensifica, especialmente, en pavimentos sujetos a la circulación de vehículos pesados. En términos generales y sin considerar otros factores que puedan influir, se puede reducir la probabilidad de estas deformaciones incrementando la rigidez del ligante mediante la utilización de un asfalto de mayor dureza.

En condiciones de bajas temperaturas de servicio, el ligante tiende a volverse

relativamente rígido, perdiendo progresivamente su capacidad de resistir tensiones y volviéndose más frágil, lo que lo hace propenso a fisuraciones. La susceptibilidad a la fisuración está directamente relacionada con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las tensiones generadas por el tránsito vehicular. Al reducir la dureza del asfalto, se minimiza el riesgo de fallos debidos a la fragilidad, contribuyendo así a mejorar la durabilidad del pavimento (Chiman, 2004).

En consecuencia, considerando lo mencionado anteriormente, la selección del asfalto apropiado para cada tipo de mezcla bituminosa se convierte en un equilibrio delicado entre dos extremos: evitar el ahuellamiento a altas temperaturas y prevenir el fisuramiento debido a la fragilidad térmica a bajas temperaturas. En otras palabras, al mejorar el comportamiento a altas temperaturas, se puede tener un impacto negativo en el comportamiento a bajas temperaturas, y viceversa.

La adición de polímeros a los cementos asfálticos ha surgido como la única tecnología que puede conciliar estos dos aspectos en ambos extremos de la temperatura, al mismo tiempo que aporta otros beneficios mencionados anteriormente.

La clasificación de los asfaltos modificados con polímeros vírgenes en Argentina es de acuerdo a la norma IRAM 6596 (2018), Tabla 4.2.

*Tabla 4.2. Clasificación de asfaltos modificados de uso vial. (Fuente: IRAM 6596, 2018)*

ENSAYO	UN.	NORMA	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4
<b>ASFALTO ORIGINAL</b>						
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	[0,1 mm]	IRAM 6576	35-50	50-80	50-80	120-150
Punto de ablandamiento (A y B)	[°C]	IRAM 6841	>60	>60	>65	>60
Punto de Fragilidad Frass	[°C]	IRAM 6831	<-5	<-10	<-12	<-15
Recuperación elástica por torsión 25 °C	[%]	IRAM 6830	>10	>40	>70	>60
Contenido de agua en volumen	[%]	IRAM 1575	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Punto de inflamación	[°C]	IRAM 6555	>230	>230	>230	>230
Densidad 25 °C	[g/cm <sup>3</sup> ]	IRAM 6587	>0,99	>0,99	>0,99	>0,99
<b>Estabilidad al almacenamiento</b>						
Diferencia de punto ablan.	[°C]	IRAM 6841	<5	<5	<5	<5
Diferencia de penetración	[0,1 mm]	IRAM 6576	<8	<10	<10	<15
<b>Ensayos sobre el residuo después del RTFOT</b>						
Variación de masas	[%]	IRAM 6582	<1	<1	<1	<1
Penetración	[% p.o.]	IRAM 6576	>70	>65	>65	>60
Variación punto ablan.	[°C]	IRAM 6841	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

En la Tabla 4.2 se puede ver que para que un asfalto sea clasificado en uno de los grupos específicos, debe cumplir con los límites establecidos para cada

categoría. Alcanzar estos límites implica, de manera directa, descartar posibles procesos enmascarados que podrían presentarse en los ligantes, como simulaciones de mayor dureza o un punto de ablandamiento superior, por ejemplo. De hecho, la pérdida de maltenos o fracciones aceitosas o resinosas debido a procesos de calentamiento excesivo o inapropiado puede elevar el punto de ablandamiento de un asfalto, pero este no podrá mantenerse dentro de los límites de penetración propuestos. Los parámetros mencionados sólo se logran mediante la modificación del ligante asfáltico con la adición de un polímero.

## **Ensayos físicos de cementos asfálticos**

### **Penetración**

Este ensayo permite determinar la consistencia de los materiales bituminosos. En líneas generales, los asfaltos de menor rigidez tienden a presentar valores de penetración más altos que aquellos de mayor rigidez. La práctica de los ensayos de penetración ha sido una metodología fundamental en la clasificación inicial de asfaltos y sigue siendo relevante en la actualidad. Este procedimiento implica colocar una aguja estándar de 1 mm de diámetro y 100 g de peso sobre una muestra de asfalto a 25 °C, permitiendo que la aguja penetre durante 5 segundos (IRAM 6576, 2004), Figura 4.1. Posteriormente, se registra la profundidad de penetración de la aguja en la muestra con una precisión de 0,1 mm.



*Figura 4.1. Penetrómetro. (Fuente propia)*

### **Punto de ablandamiento**

Se define como la temperatura en la cual el betún, dispuesto en un anillo, se hace lo suficientemente blando para facilitar el paso de una esfera de dimensiones y peso específicos.

La muestra de asfalto a estudiar se funde, se homogeniza bien mezclada evitando la incorporación de burbujas de aire a la masa, se vierte en un anillo de bronce de 15,9 mm de diámetro interno y 6,4 mm de profundidad, de modo que quede un exceso después del enfriamiento. Se llena un vaso de vidrio que contiene un termómetro, con agua destilada a 5 °C. Luego se coloca el anillo con la muestra en el agua sobre el soporte respectivo de modo que la superficie inferior quede exactamente a 25 mm sobre el fondo del vaso. Se coloca una bolilla de acero en el centro del material en el anillo. Se aplica calor de modo que la temperatura del agua aumente 5 °C por minuto, Figura 4.2. Se tomará como punto de ablandamiento la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el material asfáltico al deformarse termina de recorrer 25 mm (IRAM 6841, 2011).



Figura 4.2. a) Muestras en anillos. b) Ensayo en proceso. (Fuente propia)

### Índice de Penetración (IP)

Este índice se calcula a partir de los valores de la penetración a 25 °C y del punto de ablandamiento y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales.

El fundamento del método de obtención del IP se basa en admitir: primero que a la temperatura del punto de ablandamiento, la penetración de un cemento asfáltico es de 800 x 0,1 mm, segundo, que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, cuya pendiente depende del IP, que se calculan a partir de la temperatura del punto de ablandamiento, de la de realización del ensayo de penetración, que usualmente es a 25 °C y el valor de penetración, y tercero, atribuirle un IP cero a un cemento asfáltico con una penetración de 200 x 0,1 mm a 25 °C y un punto de ablandamiento de 40 °C.

## Viscosidad

La viscosidad aparente se define como la proporción entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de cizallamiento específica de un fluido, ya sea este newtoniano o no-newtoniano. La medición de la viscosidad se lleva a cabo mediante instrumentos llamados viscosímetros, entre los cuales se incluyen los capilares y, en la actualidad, los rotacionales. Estos dispositivos permiten determinar la respuesta del fluido a la aplicación de fuerza y la tasa de deformación asociada.

Las especificaciones de los cementos asfálticos, clasificados según su viscosidad, se establecen generalmente en función de los rangos de viscosidad a 60 °C. Además, suele especificarse una viscosidad mínima a 135 °C. Estas especificaciones buscan garantizar que los cementos asfálticos mantengan la consistencia adecuada tanto en condiciones de servicio como durante el proceso de construcción de carreteras.

La medición de la viscosidad aparente se lleva a cabo utilizando un viscosímetro rotacional con cámara termostatazada, como el Brookfield Thermosel u otros dispositivos similares, Figura 4.3. Este ensayo sigue la norma IRAM 6837 (2016).

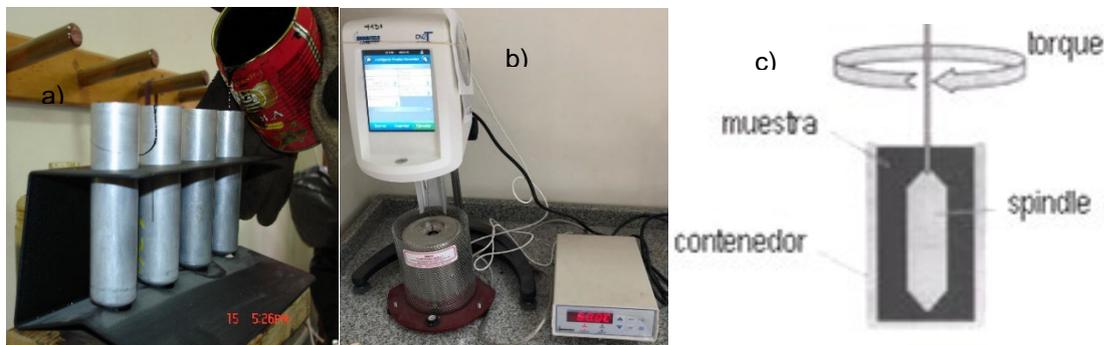


Figura 4.3. Ensayo viscosidad rotacional. a) Preparación muestras. b) Equipo. c) Esquema de ensayo. (Fuente propia)

El uso de este viscosímetro ha representado un avance significativo al proporcionar la capacidad de obtener diversas viscosidades a cualquier temperatura. Esto permite la generación de la curva de viscosidad-temperatura, la cual ofrece información crucial para diversas etapas de manipulación del cemento asfáltico. Estas etapas incluyen el bombeo del material, la interacción con los agregados en las plantas asfálticas y los procesos de compactación en las capas de rodamiento.

La comprensión de la variación de la viscosidad con la temperatura es

fundamental, ya que proporciona información sobre la susceptibilidad térmica de los asfaltos. A altas temperaturas, los asfaltos exhiben viscosidades lo suficientemente bajas como para envolver a los agregados, lo que facilita la extensión y compactación de las mezclas asfálticas. A medida que se enfrían, la viscosidad aumenta significativamente, actuando como aglomerante para los agregados y proporcionando cohesión a la mezcla. Se requiere una viscosidad de 2 poises para asegurar una envoltura adecuada del ligante alrededor de los áridos, mientras que se establece un nivel de 3 poises para asegurar un proceso de compactación efectivo de la mezcla.

### Recuperación elástica lineal y torsional

Uno de los efectos que más se evidencian de un ligante modificado es el aumento de las fuerzas de cohesión, y esto cobra especial importancia en mezclas del tipo discontinuo. En función del tipo de polímero y a la forma de la cadena polimérica son los valores de recuperación elástica tanto torsional, IRAM 6830 (2011), como lineal IRAM 6832 (2010), Figura 4.4.



Figura 4.4. Ensayo recuperación. a) Torsional. b y c) Lineal. (Fuente propia)

#### 4.1.2. Ensayos de caracterización en ligantes bases

Los ligantes asfálticos en los que se evaluaron la posibilidad de incorporar tasas crecientes de NFU fueron caracterizados, de acuerdo a la norma IRAM 6835 (2020), Tabla 4.1, como un CA-10, CA-20 y CA-30. Para ello, se determinaron la penetración, punto de ablandamiento y viscosidad rotacional a 60 °C y 135 °C. En cuanto al CA-30 se utilizaron dos de diferentes procedencias, quedando las designaciones como se observa en la Tabla 4.3. Los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización para los asfaltos base, se presentan en la Tabla 4.4, en los que a los asfaltos convencionales no se le realizó el ensayo de recuperación

elástica lineal. Asimismo, la determinación de la penetración, en los ligante convencionales, la IRAM 6835 no lo solicita. Este se determina debido a que se utilizará, en los asfaltos con NFU, como uno de los parámetros para evaluar la modificación respecto del valor original.

*Tabla 4.3. Denominación de los asfaltos utilizados. (Fuente propia)*

<b>Ligante</b>	<b>Descripción</b>
CA-10-A	Asfalto convencional clasificado por viscosidad de procedencia A
CA-20-A	Asfalto convencional clasificado por viscosidad de procedencia A
CA-30-A	Asfalto convencional clasificado por viscosidad de procedencia A
CA-30-B	Asfalto convencional clasificado por viscosidad de procedencia B
AM 3	Asfalto modificado con polímero virgen

*Tabla 4.4. Ensayos en asfaltos base. (Fuente propia)*

<b>Ligante Ensayo</b>	<b>Penet. [0,1 mm]</b>	<b>PA [°C]</b>	<b>Rec. Lineal [%]</b>	<b>Rec. Tors. [%]</b>	<b>Visc. 60 °C [dPa.s]</b>	<b>Visc. 135 °C [mPa.s]</b>	<b>Visc. 170 °C [mPa.s]</b>
CA-10-A	80	49	-	8	1530	404	-
CA-20-A	79	47	-	11	2100	381	-
CA-30-A	60	48	-	10	3450	503	-
CA-30-B	57	53	-	9	3155	474	-
AM 3	52	76	43,5	71	-	-	580

Además de los ensayos mencionado de caracterización, se han realizado la recuperación elástica torsional y lineal, Tabla 4.4, según corresponda, a los efectos de comparar y poder observar la modificación que se generan en los ligantes CA, luego de la incorporación del polvo de NFU.

#### 4.1.3. Técnicas de incorporación del polvo de NFU

Un aspecto significativo a tener en cuenta en la incorporación del polvo de NFU en los asfaltos, es el proceso de digestión o maduración. En este, el polvo de NFU se ablanda al ser agregado al asfalto a temperaturas elevadas. Las partículas se vuelven más flexibles, absorbiendo en cierta medida las fracciones ligeras del asfalto, como resinas y aceites. Esto provoca un aumento en el tamaño de las partículas, reduciendo la distancia entre el polvo y el asfalto y haciendo que el ligante sea más viscoso. La expansión del volumen del polvo de neumático en el asfalto es un indicador evidente de este proceso de digestión.

La evaluación de este proceso se puede realizar mediante la medición de la

viscosidad, considerando que se trabaja con un material compuesto cuyo flujo no es newtoniano.

La incorporación de polvo de NFU al asfalto para la producción de mezcla asfáltica en caliente tiene tres efectos principales:

- Cumple la función de espesante al incrementar la viscosidad del asfalto. En las mezclas asfálticas, este efecto posibilita la formación de una película más densa de asfalto alrededor de los agregados, sin propiciar escurrimientos o exudaciones.
- Cambia la reología de los asfaltos, aumentando su elasticidad y resiliencia a altas temperaturas, al tiempo que reduce la susceptibilidad térmica. Esto resulta en un mejor rendimiento tanto a temperaturas elevadas como bajas, mitigando los riesgos de fisuración térmica y fatiga.
- En la mezcla asfáltica mejora su rendimiento, afectando positivamente la resistencia al ahuellamiento, la fatiga y la susceptibilidad térmica, entre otras variables.

La temperatura y la energía de corte entregada al sistema asfalto – caucho permite acelerar el proceso de digestión del polvo de caucho en el asfalto.

Las formas en que se incorpora el polvo NFU en las mezclas asfálticas en caliente son variadas, reconociéndose tres procedimientos o vías, (SIGNUS, 2017):

1. **Vía seca:** En este caso, el polvo de NFU se incorpora directamente al mezclador de la planta asfáltica, siendo tiempos de digestión de la mezcla, desde que se fabrica hasta que se pone en obra, superiores a 45 minutos. El tiempo de digestión se traslada a la propia mezcla asfáltica, generando procesos de producción más lentos, con tiempos de permanencia dentro del propio proceso de producción y en la mezcla asfáltica en el camión.
2. **Vía húmeda:** Este sistema consiste en la modificación del asfalto con la adición del polvo de NFU, previo a su incorporación a la mezcla con los agregados. Una vez modificado el asfalto se incorpora como ligante modificado al mezclador de la planta asfáltica. Los equipos para la fabricación de asfaltos con NFU en laboratorio puede ser mediante un

proceso de agitación, Figura 4.5, o los que disponen de un mecanismo de cizalla, que además de cortar las partículas de NFU, produce el mezclado. Este último, dispersor, es el que se ha utilizado para la elaboración de esta tesis, Figura 4.6.



Figura 4.5. Mezclador de hélice. (SIGNUS, 2019)



Figura 4.6. Dispersor utilizado. a) Equipo. b) Rotor y estator. (Fuente propia)

El dispersor consta de un motor monofásico de 1118,55 w (1,5 HP) con posibilidad de regulación de la velocidad entre 315 y 787.5 rad/s (3000 y 7500 RPM). Este permite dispersar, emulsionar o mezclar, sistemas líquido-líquido y sólido-líquido, para la capacidad de la cuba de 2 litros. Esta es de acero inoxidable de pared doble que contiene aceite, de tal forma que el mechero calefaccionador, eleve la temperatura del mismo y no exponga en forma directa el asfalto y el polímero.

En cuanto a los equipos para la fabricación a escala industrial se pueden mencionar los mezcladores de paletas, Figura 4.7 a, utilizados para bajos contenidos de polvo de NFU en donde, en el tanque en que se realiza la mezcla, también se produce la digestión. Otro tipo de mezclador es el con disco Cowels, Figura 4.7 b y c, que trasmite una alta energía de mezclado e incluso un cierto

efecto de cizalla. El mezclador con sistema de rotor y estator, Figura 4.7 d, es otro equipo que por la holgura que existe entre dichas partes circula la mezcla y permite entregar un alto esfuerzo de cizallamiento.

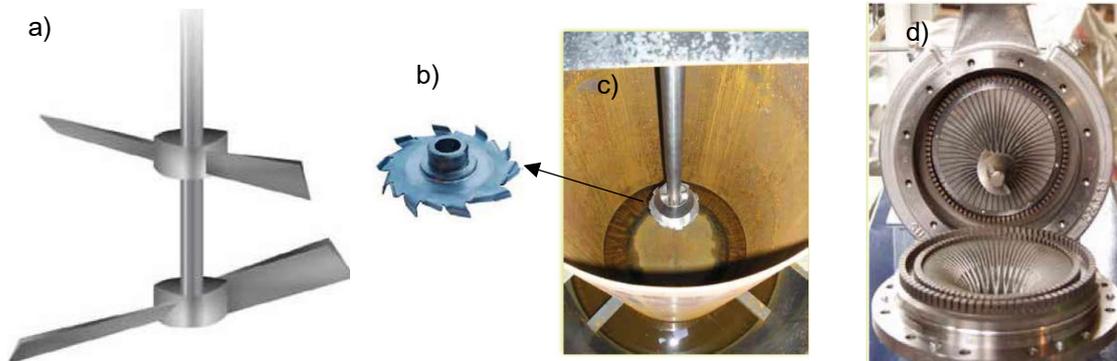


Figura 4.7. Mezcladores. a) Paletas. b) Disco Cowles. c) Recipiente. d) Rotor estator con cizalla. (SIGNUS, 2017)

Las configuraciones más habituales para la modificación industrial pueden dividirse:

- Mezclador de pequeño volumen y tanque de digestión: las dos funciones necesarias para llevar a cabo la fabricación se encuentran separadas. Este puede encontrarse montado sobre un sistema de transporte lo que le permitiría ser una planta móvil.
- Tanques gemelos mezcladores y digestores: el mezclado y digestión se completan en el mismo tanque, pero para una mayor producción, se duplica el esquema de manera que mientras uno de ellos proporciona el asfalto con NFU digerido en el otro se está realizando una nueva fabricación.
- Equipo de tanque único con un mezclador rotor – estator en el conducto de recirculación: este esquema corresponde al de las tradicionales plantas de modificación de asfaltos, y consiste en un tanque al que se incorporan asfalto y el caucho que permanecen en constante movimiento mediante paletas. El contenido se hace recircular a través de un conducto en que se ha insertado un mezclador del tipo rotor y estator de alta velocidad de cizalla.

3. **Caucho pre digerido o activado:** Este enfoque representa un cambio en la estrategia de dispersión del polvo de caucho, ya que el polvo de neumático activado, Figura 4.8, posibilita la disponibilidad de un producto más industrializado en el sitio de construcción. Esto elimina la necesidad de contar

con una instalación de dispersión en una central de modificación o en la propia planta asfáltica. En paralelo, el producto activado se integra directamente en el proceso de mezclado del asfalto convencional con los agregados, alterando así la composición de la mezcla asfáltica en lugar de afectar al asfalto en sí. Estos aditivos de polvo de NFU se introducen directamente en el mezclador de agregados o en la sección de mezclado del filler, es decir, se incorporan como un componente adicional en la planta asfáltica.



*Figura 4.8. Polvo de NFU activado. (Fuente propia)*

#### **4.1.4. Normativa y guías de caracterización**

En España, se han logrado avances significativos en lo que respecta a las especificaciones de ligantes y mezclas bituminosas que incorporan caucho de neumático. El Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas (CEDEX, 2007), elaborado por encargo del Ministerio de Medio Ambiente y del Ministerio de Fomento, es un documento, en el que se delinearon los tres tipos de ligantes con caucho que se consideraron relevantes en el contexto español de mezclas bituminosas, abordando porcentajes crecientes de modificación:

- Los betunes mejorados (BC), porcentaje de polvo de NFU entre 8 y 12 %.
- Los modificados (PMBC) y, con polímeros vírgenes y caucho entre 12 y 15 %.
- Los modificados de alta viscosidad (BMAVC), con adición entre el 15 y 22 % de polvo de NFU.

También se dan recomendaciones sobre el empleo de los distintos ligantes con caucho en mezclas:

- Tipo hormigón bituminoso (AC).

- Discontinuas (BBTM A, BBTM B).
- Drenantes (PA).
- Mezclas antirreflexión de fisuras.

Las Órdenes Circulares (OC) 21/2007 y 21bis/2009 representaron el primer conjunto de normativas de cumplimiento obligatorio en las obras del Ministerio de Fomento. Estos documentos hacen mención de las especificaciones técnicas de los ligantes con caucho, incluyendo los BMAVC, Tabla 4.5, así como sus pautas de aplicación en la obra. Además, introducen directrices orientativas sobre el tipo de mezcla con caucho más apropiada en función del proyecto específico y sus requisitos.

*Tabla 4.5. Betunes modificados de alta viscosidad con caucho. (SIGNUS, 2017)*

Características	Norma de referencia	Un.	BMAVC-1	BMAVC-2	BMAVC-3
Betún original					
Penetración 25° C	UNE EN 1426	[0,1 mm]	15-30	35-50	55-70
Punto de reblandecimiento	UNE EN 1427	[°C]	≥75	≥70	≥70
Punto de fragilidad Fraass	UNE EN 12593	[°C]	≤ - 4	≤ -8	≤ -15
Fuerza ductilidad (5cm/min)	UNE EN 13589 UNE EN 13703	[j/cm <sup>2</sup> ]	- ≥ 2	≥ 2 -	≥ 3 -
Consistencia (flotador a 60 °C)	NLT 183	[S]		≥ 3000	
Viscosidad dinámica	UNE EN 13302	[mPa.s]	- ≥ 2000	≤ 7500 ≥ 1200	≤ 5000 ≥ 800
Rec. elástica	UNE EN 13398	[%]	≥ 10	≥20	≥30
Estabilidad al almacenamiento (*)	Dif. Anillo y bola Dif. penetración	[°C] [0,1 mm]		≤ 5 ≤ 20	
Punto de inflamación	UNE EN ISO 2592	[°C]		≥ 235	
Residuo del ensayo de película fina y rotura	UNE EN 12607-1				
Variación de masa	UNE EN 12607-1	[%]	≤0,8	≤0,8	≤1,0
Penetración retenida	UNE EN 1426	[% p.o.]		≥ 60	
Variación del punto de reblandecimiento	UNE EN 1427	[°C]	Mín. - 4	Máx. +10	Mín. - 5 Máx. +12

(\*) Únicamente exigible a ligantes que no se fabriquen "in situ".

Las mezclas antifisuras fabricadas con ligante BMAVC, que de acuerdo con la OC 21/2007, son idóneas para rehabilitación en las que se precise resistencia a la reflexión de fisuras. En el anexo 1 "Mezclas tipo con polvo de caucho" de SIGNUS (2017), se presenta las fichas de formulaciones de mezclas con caucho, correspondientes a experiencias reales. En éstas, se muestran granulometrías, tipo de agregado y ligantes, temperaturas de trabajo, etc. Un caso particular, que aborda dichas fichas, corresponde a las mezclas para retardo de fisuras. Esta se muestra en el capítulo 5, ya que ha sido utilizada para realizar algunas experiencias de la presente tesis.

En la guía SIGNUS (2019), se menciona que se han construido más de 1100

km en España utilizando polvo de NFU y que se han logrado buenos resultados respaldando la confianza en esta tecnología. Asimismo, persisten aún algunos temores en la formulación de los asfaltos caucho, tanto en los fabricantes de ligantes como en las empresas constructoras de pavimentos. Por ello, esta guía propone ser un documento sencillo que sirva a las empresas constructoras y para la formulación de asfaltos con caucho. En cuanto a los ligantes modificados de alta viscosidad, el BMAVC 1 y el BMAVC 3, da orientaciones para su fabricación. También, presenta otro tipo de ligante de alta viscosidad, que lo ha denominado BMAVC 1b, Tabla 4.6, donde la letra “b” indica que es una variedad más blanda que el BMAVC 1. El motivo de incluirlo en esta guía ha sido que, después de la aprobación de la OC 21/2007 se ha observado que los BMAVC 1 no logran ofrecer la flexibilidad requerida en las zonas con inviernos muy fríos, por lo que se han aplicado con mejor performance un ligante similar, pero fabricado a partir de una base más blanda.

Tabla 4.6. *Betún modificado de alta viscosidad con caucho, blando. (SIGNUS, 2019)*

Características	Norma de referencia	Un.	BMAVC-1b
Penetración 25° C	UNE EN 1426	[0,1 mm]	30-40
Punto de reblandecimiento	UNE EN 1427	[°C]	≥68
Viscosidad dinámica	135 °C	UNE EN 13302	-
	170 °C		≥ 2000
Recuperación elástica	UNE EN 13398	[%]	≥ 10

En Argentina, la norma IRAM 6673 (2012) considera dos tipos de asfalto modificado con inclusión de caucho molido, de acuerdo con su uso más frecuente. En la Tabla 4.7, se pueden observar los valores exigidos:

- Asfalto modificado con inclusión de caucho molido AC 1: utilizado para carpetas de rodamiento resistentes a la deformación plástica y a la fatiga.
- Asfalto con inclusión de caucho AC 2: comúnmente utilizado para capas drenantes.

*Tabla 4.7. Requisitos de los asfaltos con inclusión de caucho. (IRAM 6673, 2012)*

Requisito	Un.	AC 1		AC 2		Mét.
		Min.	Max.	Min.	Max.	
Penetración (25 °C; 100 g; 5s)	[0,1 mm]	35	50	50	80	IRAM 6576
P. ablandamiento	[°C]	60	-	55	-	IRAM 6841
Solubilidad en tricloroetileno	[%]	92	-	92	-	IRAM 6585
Rec. elástica torsional	[%]	15	-	15	-	IRAM 6830
Vis. Rotacional a 170 °C	[mPa.s]	-	800	-	600	IRAM 6837
P. de inflamación	[°C]	235	-	235	-	IRAM-IAP A 6555
Ensayo de estabilidad al almacenamiento						IRAM 6840
Dif. De punto de ablandamiento		-	10	-	10	IRAM 6841
Ensayo de calentamiento en película delgada rotativa						IRAM 6839
Penetración (respecto de la penetración original) retenida		55	-	55	-	IRAM 6576
Pérdida de masa		-	1	-	1	IRAM 6839

Esta clasificación resulta similar a los denominados BC 35/50 y BC 50/70, betunes mejorados con caucho. Esta norma, hasta el momento no presenta una clasificación de modificados con incorporación de polvo de NFU que cumplan con los límites de los asfaltos modificados y que podrían llevar como en la especificación española alguna identificación que permita vislumbrar, por ejemplo, la participación del polvo de NFU en un AM 3. En el transcurso del desarrollo de esta tesis, la misma norma, se encuentra en un proceso de estudio y discusión respecto a las modificaciones que se le han incorporado al considerar los diferentes tipos de asfaltos con inclusión de caucho. Estos son los identificados como AC que son los asfaltos con inclusión de caucho molido, los AMC que son los asfaltos modificados con inclusión de caucho molido y los AMAVC que son los asfaltos modificados de alta viscosidad con inclusión de caucho molido. Estos grupos presentan diferentes tipos en función del grado de modificación que posean. Respecto a la especificación española, es posible mencionar que son similares a los BC, PMBC y BMAVC respectivamente.

#### 4.1.5. Reología

La reología aborda el estudio de la reacción de deformación y flujo que experimentan los materiales cuando se les somete a cargas en condiciones específicas. En este campo, se reconoce que estas respuestas pueden vincularse con factores como el esfuerzo aplicado, la temperatura del material, la velocidad de aplicación de la carga y, en algunos casos, el tiempo de carga.

Las características reológicas del asfalto se encuentran condicionadas por las proporciones en las que se hallan sus componentes, las cuales difieren según la

procedencia de los crudos de petróleo. El comportamiento reológico del ligante ejerce una influencia considerable en las propiedades de la combinación asfalto-agregado.

El asfalto se categoriza como un material viscoelástico debido a que presenta características viscosas y elásticas de manera simultánea. Esto implica que su comportamiento se sitúa en un punto intermedio entre un sólido de Hooke, elástico, y un líquido de Newton, viscoso. A altas temperaturas, mayores a 100 °C, el cemento asfáltico se asemeja a un fluido viscoso, exhibiendo propiedades semejantes a la viscosidad de un lubricante utilizado, por ejemplo, como aceite para motores. En cambio, a bajas temperaturas, < 0 °C, su comportamiento se asemeja al de un sólido elástico, comparándose a una banda de goma. Bajo la aplicación de carga, el ligante se alarga o comprime, adoptando diversas formas, pero al retirar la carga, recupera su forma original.

A una temperatura intermedia, que es la condición típica para el pavimento, el cemento asfáltico exhibe tanto características de fluido viscoso como de sólido elástico. Para establecer las temperaturas óptimas de mezclado y compactación en el diseño de mezclas asfálticas, se busca utilizar temperaturas equiviscosas. Esto se hace con el propósito de minimizar el impacto que la rigidez del ligante podría tener sobre las propiedades volumétricas de la mezcla durante el proceso de mezclado en caliente en la planta, sin importar si se trata de un ligante original o modificado, e independientemente de la gradación del agregado (Asphalt Institute, 2006).

La viscosidad puede ser medida por el viscosímetro rotacional, como se ha mencionado, que consta de un cilindro rotacional coaxial que cuantifica la viscosidad mediante el torque necesario para hacer girar un eje. Para analizar las propiedades viscoelásticas de los asfaltos, se sugiere utilizar el reómetro de corte dinámico (DSR), el cual mide la respuesta de la deformación específica de corte del espécimen bajo la aplicación de un torque.

En 1962, el Instituto del Asfalto propuso utilizar la viscosidad Saybolt Furol del asfalto como el criterio clave para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla. La temperatura de mezclado se fijó en un rango de viscosidad de  $170 \pm 20$  centistokes, mientras que la temperatura de compactación se estableció en  $280 \pm 30$  centistokes. Estos valores continuaron siendo relevantes

incluso durante la década de los noventa, cuando se introdujeron las especificaciones SUPERPAVE (Asphalt Institute, 2003) para el diseño de mezclas asfálticas. Este último, es un sistema para especificar ligantes asfálticos, agregados, diseño de mezclas y predicciones del comportamiento de la misma, el cual involucra procedimientos para la selección cuidadosa de materiales. En la transición a las especificaciones SUPERPAVE, se mantuvieron los valores establecidos por el Instituto del Asfalto en los sesenta, pero se adoptó el viscosímetro rotacional para determinarlos. Además, las unidades de viscosidad cambiaron de centistokes a unidades del Sistema Internacional, resultando en  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s para la temperatura de mezclado y  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s para la temperatura de compactación. Estos nuevos valores, se han convertido en estándares generalizados y forman parte integral de las especificaciones de la norma ASTM D 2493 (2001), titulada "Standard viscosity-temperature chart for asphalts". Incluso han perdurado en la actualización de 2006 del Asphalt Institute.

Yildirim y otros (2006) llevaron a cabo un estudio exhaustivo que involucró 50 ligantes asfálticos, tanto modificados como no modificados, disponibles comercialmente. El objetivo era verificar la validez de la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación utilizando las curvas reológicas, siguiendo las pautas de la norma de la ASTM D 2493 (2001). En su investigación, los autores emplearon la ley de potencia para establecer una relación lineal entre los valores de viscosidad, en escala logarítmica, y los de temperatura, también en escala logarítmica. Llegaron a la conclusión de que, según los métodos convencionales y las temperaturas obtenidas, los asfaltos modificados mostraron niveles más elevados de temperatura de mezclado y compactación en comparación con los requerimientos viales estándar.

En condiciones de temperaturas bajas de servicio, como se ha mencionado anteriormente, el ligante experimenta un aumento en su rigidez, perdiendo gradualmente su capacidad de resistencia a las tensiones. En este estado, se vuelve más frágil y susceptible a fisuras. También, en situaciones de altas temperaturas de servicio, existe la posibilidad de que el ligante se vuelva más blando, lo que puede facilitar la deformación de la mezcla, conocida como ahuellamiento. Además, que la incorporación de polímeros a los cementos asfálticos es la tecnología capaz de abordar de manera integral estos dos aspectos

en ambos extremos de la escala de temperatura (Botasso, 2018).

En la Figura 4.9, se representan las variaciones de viscosidad en relación con las variaciones de temperatura. Se observa que un asfalto convencional experimenta un cambio más pronunciado en su viscosidad para una variación de temperatura dada, en comparación con un asfalto ideal al que tiende el comportamiento de un asfalto modificado (Garnica, 2004).

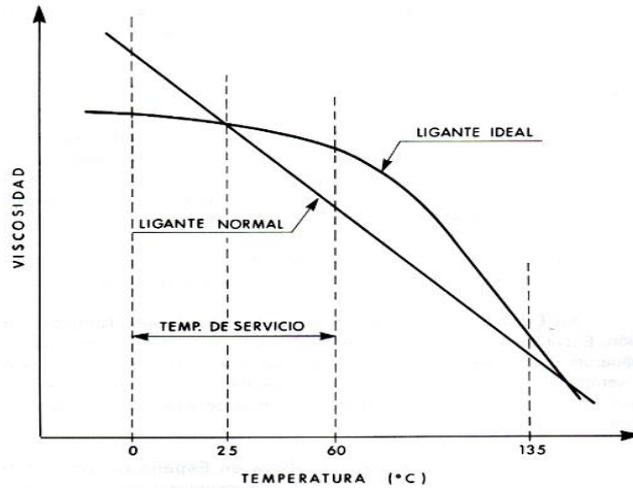


Figura 4.9. Susceptibilidad térmica en asfaltos. (Botasso, 2018)

### Comportamiento reológico

Los ligantes asfálticos, debido a su composición única, exhiben comportamientos diversos frente a diferentes factores como esfuerzos, temperatura, velocidad de perturbación y duración de la aplicación de dicha perturbación.

En situaciones de carga, los materiales pueden manifestar comportamientos distintos según su estructura y nivel de esfuerzo. Un material presenta un comportamiento elástico si experimenta una deformación unitaria inmediata al aplicar la carga, se mantiene constante durante la aplicación de la carga y desaparece al retirarla. Por otro lado, en un comportamiento plástico, se observa una deformación unitaria permanente después de retirar la carga.

Los materiales viscoelásticos exhiben un comportamiento elástico en su estado sólido, con deformaciones unitarias lineales que desaparecen al finalizar la perturbación. Estos materiales también manifiestan un comportamiento viscoso en su estado líquido. Entre ellos, se encuentran los newtonianos y los plásticos de Bingham, que se deforman linealmente con una velocidad específica, los

dilatantes, que aumentan su viscosidad con la velocidad de deformación, y los pseudoplásticos, que disminuyen su viscosidad a mayor velocidad de corte o cizallamiento. Además, hay materiales cuya viscosidad depende del esfuerzo, la velocidad de deformación y el tiempo de aplicación de la perturbación. Entre estos se encuentran los tixotrópicos, que disminuyen su viscosidad con el tiempo de aplicación del esfuerzo, mostrando una recuperación específica en reposo, y los reopéticos, que aumentan su viscosidad con el tiempo de perturbación, siendo poco frecuentes (Rowe, 2012).

La obtención de información sobre parámetros reológicos que describen el comportamiento de los materiales a partir de ensayos que abordan rangos no lineales representa un desafío complejo, ya que las variables a medir dependen del nivel de esfuerzo, la deformación unitaria, el tiempo de carga y la temperatura.

Bahía (2009) destaca que las propiedades que mejor caracterizan a los ligantes dentro del rango lineal son la resistencia a la deformación bajo carga y la distribución de la deformación discriminada en sus componentes elásticos y viscosos.

Los parámetros obtenidos a través de ensayos oscilatorios de corte incluyen el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ). La magnitud de  $G^*$  está vinculada a la resistencia total a la deformación bajo una carga, cuando se somete a pulsos repetidos de tensiones de cizallamiento. El ángulo de fase ( $\delta$ ) está asociado con la distribución relativa de la deformación en términos elásticos, que es recuperable, y viscosos, que no es recuperable, Figura 4.10. Es importante destacar que estos parámetros experimentan variaciones significativas en respuesta a cambios de temperatura y duración de la carga.

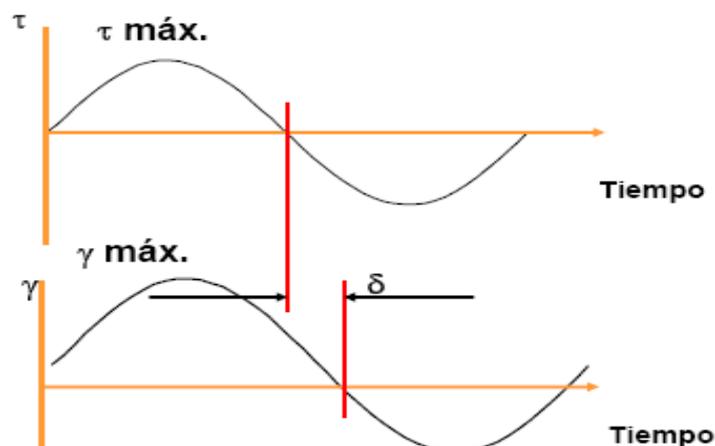


Figura 4.10. Esfuerzo de corte y deformación asociada en el DSR. (Transporte III, 2019).

## Aplicaciones y determinaciones de los ensayos oscilatorios

### Barrido de temperatura

En el contexto de las mezclas asfálticas, la resistencia a la deformación permanente y la susceptibilidad al fisuramiento por fatiga están estrechamente relacionadas con parámetros controlados por la contribución mecánica del ligante asfáltico. Dentro del sistema SUPERPAVE, la evaluación de estos parámetros se lleva a cabo mediante ensayos de carga oscilatoria realizados en un reómetro dinámico de corte (DSR), en el ligante asfáltico. Durante estos ensayos, se obtienen el ( $G^*$ ) y ( $\delta$ ), datos que se derivan a partir de la medición del torque y el desplazamiento angular de una muestra. En el ensayo, el asfalto se coloca y comprime entre dos placas paralelas, una de las cuales es fija y la otra oscila. La velocidad de oscilación, la frecuencia, se ajusta según los requisitos específicos de la evaluación. La muestra se somete a carga entre dos platos paralelos, y experimenta una deformación unitaria controlada para asegurar que se mantenga en el rango lineal, todo ello a una temperatura constante (Bahía, 2009)

El equipo disponible y utilizado para los distintos ensayos reológicos es un Reómetro Híbrido Discovery HR-2, marca DSR de TA Instruments. Este cuenta con una cámara de prueba ambiental Environmental Test Chamber (ETC), como se muestra en la Figura 4.11. Las pruebas se han realizado utilizando la geometría de placas paralelas con diámetro y separación entre ellas, en función de la determinación buscada.

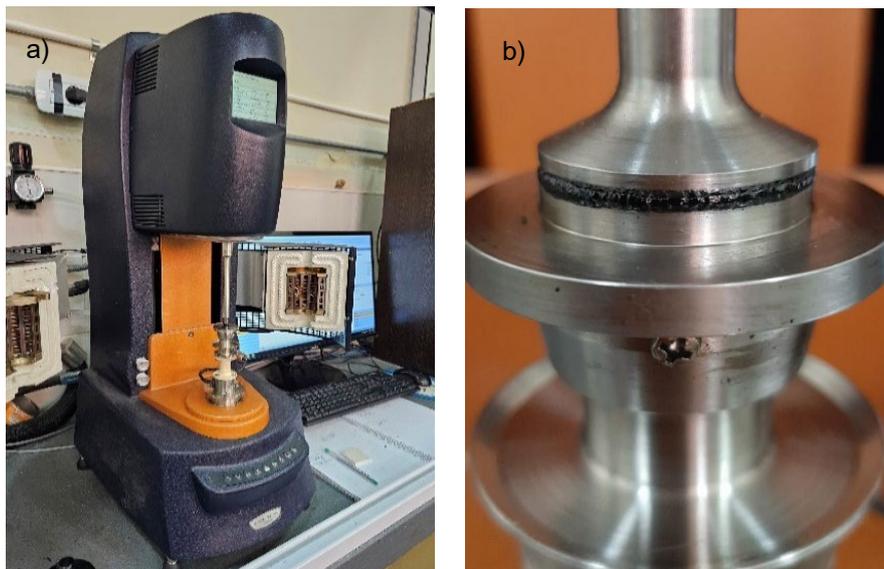


Figura 4.11. a) Reómetro de corte dinámico. b) Placa  $\varnothing 25$  mm, muestra asfalto con NFU. (Fuente propia)

En el enfoque de SUPERPAVE, el parámetro  $G^*/\sin \delta$  desempeña el papel de parámetro de control para evaluar la deformación permanente. Esta forma de falla se manifiesta en las etapas tempranas del pavimento, especialmente en asfaltos originales o no envejecidos, y adquiere una importancia crítica a altas temperaturas. Establece un requisito mínimo de 1 kPa para ligantes vírgenes y 2,2 kPa para ligantes envejecidos. De acuerdo con la norma AASHTO T315 (2022), que se aplica tanto a cementos asfálticos originales como a envejecidos, se utiliza un disco de 25 mm con una separación entre discos de 1 mm. Las determinaciones se llevan a cabo a diversas temperaturas, para lo cual se realiza un barrido de temperaturas, con el objetivo de identificar las condiciones especificadas.

### **Barrido de amplitud lineal (LAS)**

La caracterización reológica de los asfaltos mediante el reómetro de corte dinámico (DSR) analiza el comportamiento del material en la región viscoelástica lineal, abordando parámetros tanto relacionados con la resistencia a la deformación como con la fatiga. Es importante destacar que el daño por fatiga en los pavimentos asfálticos se ve fuertemente influenciado por la composición específica del asfalto, y esta falla ocurre más allá de la región lineal viscoelástica. Debido a esto, los métodos tradicionales propuestos por SUPERPAVE, como  $G^* \times \sin \delta$ , no abordan completamente esta problemática, ya que el análisis realizado carece de variaciones en la tensión de deformación, lo que se traduce en la evaluación de un solo estado de carga en el reómetro (Hintz et al., 2011) (Yue et al., 2021).

En función de estas limitaciones, la prueba de barrido de tiempo en el reómetro de corte dinámico se presenta como una alternativa más precisa para cuantificar la fatiga en el ligante asfáltico. Este enfoque implica la evaluación del módulo complejo de la muestra a una frecuencia, amplitud y temperatura específicas. El criterio de falla del material según esta prueba se establece cuando el módulo complejo cae al 50 % del valor inicial. Al repetir este procedimiento con diversas amplitudes, se construye la relación entre la deformación aplicada y los ciclos de fallo del material, expresada mediante la Ecuación 4.1.

$$Nf = A(\gamma)^B \text{ Ecuación 4.1}$$

Donde  $Nf$  es el número de ciclos hasta la falla, y la deformación por corte

específica, A y B los parámetros de ajuste del modelo que dependen del material. Este esquema de ensayo y modelo de representación es el que se utiliza frecuentemente para evaluar la fatiga en mezclas asfálticas mediante la viga de cuatro puntos.

No obstante, a pesar de ser una propuesta que supera la metodología de fallo por fatiga en asfalto propuesta por SUPERPAVE, la realización del ensayo de barrido de tiempo en el DSR implica extensos períodos de prueba para el material a evaluar, los cuales varían según la deformación aplicada a la muestra (Saboo, 2020). Por otro lado, se requiere llevar a cabo una prueba para cada punto específico de deformación aplicada, generando como resultado múltiples muestras necesarias para construir la curva de fallo mencionada anteriormente. Además, la adopción del criterio de reducción al 50 % del módulo inicial como indicador de falla del material se considera arbitraria, ya que aún queda menos de la mitad de la vida útil del material a utilizar (Wang, 2015).

En los últimos años, como alternativa a las metodologías mencionadas previamente, ha surgido la propuesta de emplear el ensayo de barrido de amplitud lineal para evaluar la fatiga en cementos asfálticos. Este método implica la evaluación de la muestra mediante un incremento progresivo en el esfuerzo de deformación, simulando así las tensiones generadas en un pavimento. Los resultados obtenidos del escaneo de amplitud lineal se aplican a la Teoría Simplificada del Daño Viscoelástico Continuo (S-VECD), que modela el trabajo interno del material y cuantifica el daño a través de cambios microestructurales en la muestra. Basándose en el estudio llevado a cabo por Schapery y otros (1999), se establece la ley de acumulación de daño, representada por la Ecuación 4.2.

$$\frac{ds}{dt} = \left( -\frac{\partial w}{\delta S} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 4.2}$$

En donde S es el crecimiento del daño en la muestra, W el trabajo realizado, t el tiempo y  $\alpha$  el parámetro de integridad de la muestra. Esta teoría se aplica recientemente a estudios para predecir la fatiga tanto en asfaltos como en mezclas asfálticas.

La obtención de  $\alpha$ , se determina como la inversa de la pendiente del ensayo de barrido de frecuencia, en el que la muestra se considera sin daño. Por otro lado, el trabajo realizado por la muestra se puede modelar según la Ecuación 4.3.

$$W = \pi(\gamma_0)^2 G^* \sin \delta \text{ Ecuación 4.3}$$

En donde  $W$  es el trabajo realizado expresado como energía disipada,  $\gamma_0$  la deformación cortante específica aplicada,  $G^*$  el módulo de corte complejo y  $\delta$  el ángulo de fase. De esta manera, la Ecuación 4.2 se puede integrar numéricamente usando la Ecuación 4.3, para llegar a la expresión del crecimiento del daño, que se muestra en la Ecuación 4.4.

$$S = \sum_{j=1}^N [\pi(\gamma_0)^2 (C_{j-1} - C_j)]^{(\alpha/1+\alpha)} (t_j - t_{j-1})^{(1/1+\alpha)} \text{ Ecuación 4.4}$$

En donde  $C_j$  es la relación entre el módulo en cada punto y el módulo inicial del material sin daño,  $\gamma_0$  es la deformación cortante aplicada y  $t$  es el tiempo.

Para cuantificar el daño que presentan las muestras durante el ensayo se pueden trazar las curvas de daño C-S, que representan la integridad de la muestra en función del daño acumulado. Dicha curva se puede ajustar mediante la Ecuación 4.5.

$$C = C_0 - C_1(S)^{C_2} \text{ Ecuación 4.5}$$

En donde  $C_0 = 1$  y  $C_1$  y  $C_2$  son los coeficientes de ajuste del modelo. A partir de diferenciar la Ecuación 4.5, y sustituyéndolo en la Ecuación 4.2, se obtiene la Ecuación 4.1, que en su forma extendida aparece como la Ecuación 4.6.

$$N_f = \frac{f(D_f)^k}{k \pi C_1 C_2} \gamma^B \text{ Ecuación 4.6}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de prueba, definida a 10 Hz,  $D_f$  es el criterio de falla adoptado,  $k = 1 + (1 - C_2) \alpha$ , y  $B = -2\alpha$ . El estudio realizado por Zapata y otros (2023), menciona que la deformación específica proporcionada por el asfalto representa entre 12 y 90 veces la deformación específica de la mezcla asfáltica. Finalmente, también expresa que este parámetro se fija en 50 veces.

Existen diferentes criterios de falla  $D_f$ , para definir el límite de fatiga de los asfaltos que contemplan este ensayo. Para la determinación de la cantidad de ciclos hasta la falla se ha utilizado como criterio, la caída del valor de la curva C-S en un 35 % respecto al valor inicial (Zapata et al., 2023).

## 4.2 Obtención del asfalto con elevada tasa de polvo de NFU

### 4.2.1. Dispersiones realizadas en asfaltos CA 10, CA 20 y CA30

Las incorporaciones de NFU en los ligantes asfálticos, presentados en la Tabla 4.4, se realizaron en cantidades crecientes, utilizando el dispersor mostrado en la Figura 4.6. Las mismas fueron determinadas como porcentaje en peso del ligante.

La dispersión se realizó incorporando el polvo de neumático de tamaño pasa malla tamiz 0,71 mm (N° 25) en el asfalto colocado en la cuba inferior, ver Figura 4.12, el cual se encontraba a temperatura para comenzar el mezclado. La incorporación se realizó en aproximadamente 5 minutos y el tiempo total en el equipo fue de 60 minutos. La velocidad a la cual se elaboraron las dispersiones estuvo entre 735 y 787,5 rad/s (7000-7500 RPM) y la temperatura entre 180-190 °C. Este procedimiento se realizó para cada una de las distintas combinaciones presentadas en la Tabla 4.8, que muestra las distintas cantidades de NFU y las diferentes combinaciones de dispersiones realizadas.



Figura 4.12. Dispersión de NFU en asfalto. (Fuente propia)

Tabla 4.8. Dispersiones de ligantes y NFU. (Fuente propia)

Ligante	NFU [%]	Denominación
CA-10-A	15	CA-10-A+15%
	20	CA-10-A+20%
	22	CA-10-A+22%
	30	CA-10-A+30%
CA-20-A	20	CA-20-A+20%
	30	CA-20-A+30%
CA-30-B	20	CA-30-B+20%
	22	CA-30-B+22%
	24	CA-30-B+24%
CA-30-A	30	CA-30-B+30%
CA-30-A	24	CA-30-A+24%

#### 4.2.2. Caracterización de las dispersiones

Una vez realizada cada una de las dispersiones de la Tabla 4.8, se procedió a la determinación de la penetración, punto de ablandamiento, viscosidad rotacional a 135 °C y 170 °C y la recuperación elástica torsional, estos resultados se presentan en la Tabla 4.9. Además, al CA-30-A+24% se le realizó la determinación de la recuperación elástica lineal, obteniendo un 40 % en el mismo.

*Tabla 4.9. Resultados de ensayos en las dispersiones (Fuente propia)*

Ligante/ Ensayo	Penetración [0,1 mm]	PA [°C]	Rec. torsional [%]	Visc. 135 °C [mPa.s]	Visc. 170 °C [mPa.s]
CA-10-A+15%	55	56	42	1418	463
CA-10-A+20%	57	59	50	3355	1266
CA-10-A+22%	58	60	52	5761	1499
CA-10-A+30%	48	66	59	11289	4245
CA-20-A+20%	43	64	62	5281	1878
CA-20-A+30%	37	70	69	63958	15679
CA-30-B+20%	27,5	70	54	11613	2063
CA-30-B+22%	27,5	73	58	17368	2972
CA-30-B+24%	27,5	75	54	26594	4247
CA-30-B+30%	22	81	56	281541	44895
CA-30-A+24%	30	68	40	10459	2200

Los resultados de la Tabla 4.9 muestra que con las sucesivas incorporaciones de porcentajes de polvo de NFU, los ligantes bases sufrieron modificaciones. En las primeras dispersiones realizadas, se comenzó utilizando el CA-10-A, partiendo de éste por su mayor penetración y menor viscosidad a 135 °C, Tabla 4.4, siendo esto considerado como favorable para admitir una elevada tasa de incorporación del polvo de NFU. Sin embargo, en las cuatro dispersiones realizadas incrementando el porcentaje de polvo de NFU, se observó que, respecto a las determinaciones de su condición original, Tabla 4.4, la penetración fue disminuyendo y aumentando el punto de ablandamiento, la recuperación torsional y la viscosidad a 135 °C. Esto manifestó que se lograba cierta modificación, pero no lo suficiente para alcanzar el estándar buscado. Posteriormente, en el CA-20-A, partiendo de los valores en su condición original, Tabla 4.4, en las dos inclusiones de polvo de NFU, se encontró la misma tendencia de aumento o disminución en los mismos parámetros analizados para el CA-10-A. Por ello, se consiguió que se modificaron, pero en el caso del 20 % de NFU no se alcanzó el estándar buscado y en el 30 % de NFU la viscosidad a 135 °C resultó muy elevada. Luego en el CA-30-B, realizando los mismos análisis que, en los anteriores

respecto a su condición original, se logró una marcada disminución de la penetración, elevadas viscosidades a 135 °C y un fuerte incremento en el punto de ablandamiento y recuperación torsional, aunque ésta fue menor en algunos casos a las obtenidas en dispersiones respecto a los ligantes bases anteriores. En cuanto al CA-30-A mostró una situación intermedia entre las tasas incorporadas al CA-20-A y al CA-30-B. En resumen, podría mencionarse que los cambios al incorporar el polvo de NFU en penetración, punto de ablandamiento, recuperación torsional y viscosidad a 135 °C, fueron más significativos en los ligantes considerados como más “duros”, es decir aquellos que tienen una más alta clasificación por viscosidad, Tabla 4.1.

#### **4.2.3. Elaboración y resultados de asfalto con alta tasa de NFU, realizado en laboratorio vial de la Universidad Politécnica de Madrid.**

En el marco de la beca Movilidad profesorado argentino, del Ministerio de Educación de la Nación Argentina y la Fundación Carolina de España, se realizó una estancia doctoral de tres meses en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en el laboratorio vial. Durante la misma, se desarrolló un proyecto de investigación, en el que en su inicio se trabajó con la elaboración del asfalto con incorporación de altas tasas de NFU y luego, con éste, en la elaboración de mezclas asfálticas. Estas últimas se verán en el capítulo 5.

Los materiales utilizados para el desarrollo experimental han sido polvo de caucho de NFU, Figura 4.13 a, ligante asfáltico convencional, ligante asfáltico modificado con SBS, utilizado como referencia, denominado PMB 45/80-65, y agregados. El ligante base usado para incorporar el NFU, ha sido un betún de penetración 50/70. El NFU presenta un tamaño obtenido del pasante del tamiz 0,71 mm (N° 25).

El asfalto con alta tasa de NFU, fue definido en una proporción de un 22 % de NFU, respecto al peso del ligante base, obteniendo así uno de alta viscosidad, como un BMAVC-1b. La elaboración del mismo, se llevó a cabo realizando un previo mezclado de ambos en forma manual, Figura 4.13 b. Posteriormente la dispersión fue mediante el equipo dispersor, ver Figura 4.13 c, a una temperatura de 185 °C y 60 minutos de mezclado (Segura et al., 2022).

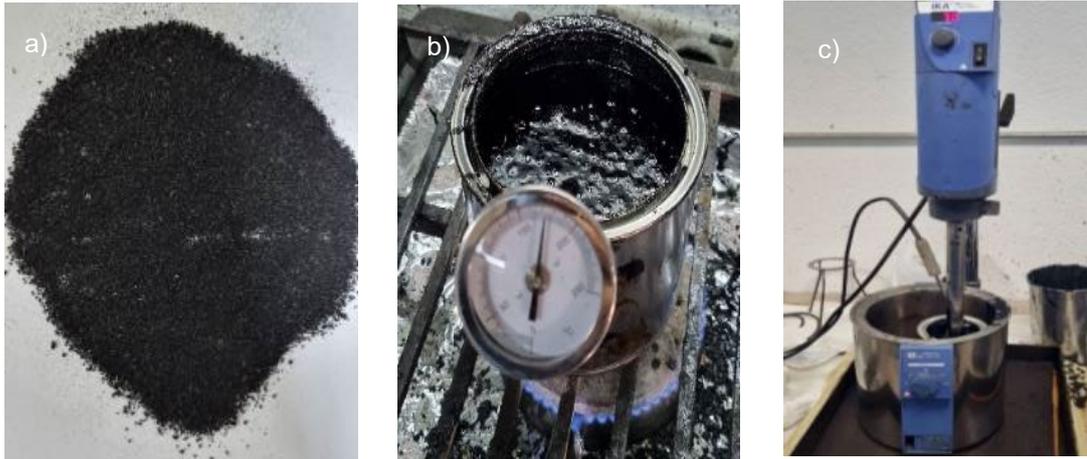


Figura 4.13. *Dispersión en UPM. a) Polvo de NFU. b) Mezclado previo. c) Equipo dispersor. (Fuente propia)*

La caracterización del asfalto con NFU se determinó mediante ensayos de viscosidad, según norma UNE-EN 13302 (2003) a diferentes temperaturas, penetración según norma UNE-EN 1426 (2007), punto de ablandamiento según norma UNE-EN 1427 y retorno elástico según norma UNE-EN 13398 (2010), Figura 4.14 a, b, c y d respectivamente.

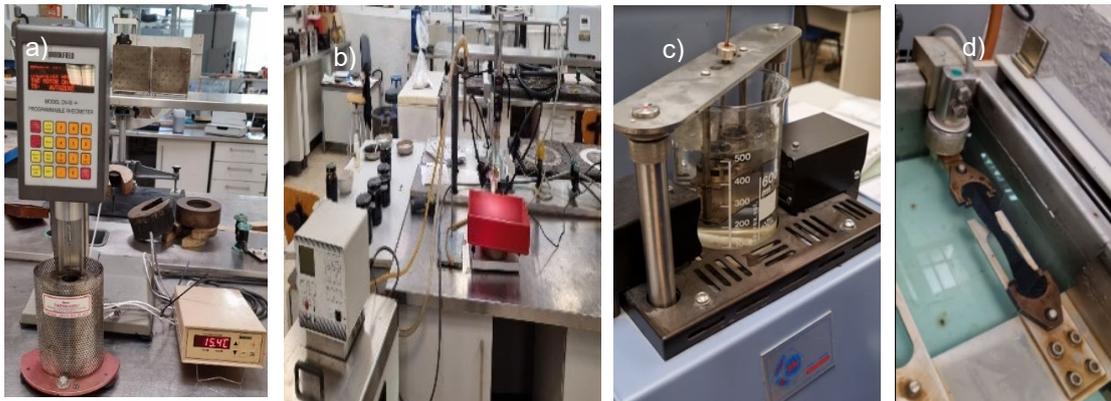


Figura 4.14. *Ensayos de caracterización de asfaltos en UPM. a) Viscosidad. b) Penetración. c) Punto de ablandamiento. d) Retorno lineal. (Fuente propia)*

Los resultados de los ensayos en el asfalto base y en el que se incorporó NFU se pueden ver en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. *Resultados de ensayos en ligantes utilizados en experiencia UPM. (Fuente propia)*

Ensayo/Ligantes	Unidades	50/70	BMAVC-1b	PMB 45/80-65	Norma UNE-EN
Penetración	[0,1 mm]	57	33	54	1426
P. de abland.	[°C]	51,4	72,9	67,4	1427
Viscosidad a 135 °C	[mPa.s]	410	7325	-	13302
Viscosidad a 170 °C	[mPa.s]	131	1022	-	13302
Retorno elástico	[%]	-	38,5	70	13398

#### 4.2.4. Criterio de adopción del asfalto con alta tasa de NFU

En guía SIGNUS (2017, 2019), se establece valores máximos y mínimos, que se muestran resumidamente en la Tablas 4.11, para los parámetros determinados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.11. Resumen de valores límites de las especificaciones utilizados. (Fuente propia)

Ensayo	Un.	BMAVC-1	BMAVC-1b	BMAVC-2	BMAVC-3	Norma UNE-EN
Penetración	[0,1 mm]	15-30	30-40	35-50	55-70	1426
P. de abland.	[°C]	≥ 75	≥68	≥ 70	≥ 70	1427
Viscosidad a 135 °C	[mPa.s]	-	-	≤ 7500	≤ 7000	13302
Viscosidad a 170 °C	[mPa.s]	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1200	≥ 800	13302

En el manual del CEDEX (2007) y en la guía SIGNUS (2017) se menciona que las mezclas antifisuras, son posible de obtenerse a partir de un asfalto BMAVC-1 y en su actualización del año 2019, el BMAVC-1b. Por ello, para la evaluación de los resultados, se han realizado gráficos con lo presentado en la Tabla 4.9. Estos se muestran en las Figuras 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18, de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad a 135 °C y 170 °C respectivamente, para cada una de las dispersiones. En las mismas figuras, se han trazado los límites mostrados en la Tabla 4.11.

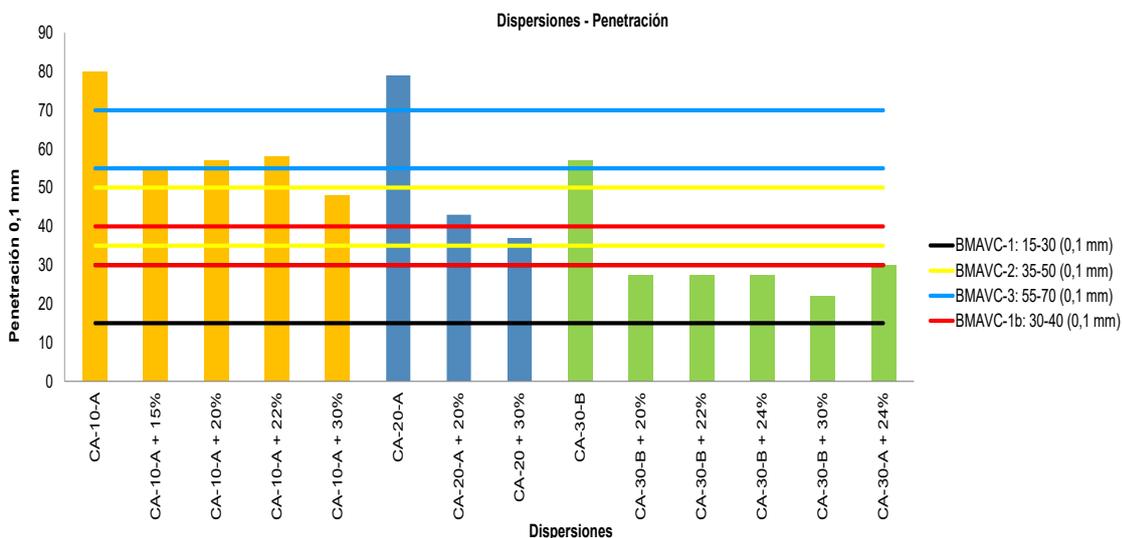


Figura 4.15. Resultados de penetración en todas las dispersiones realizadas y valores límites. (Fuente propia)

Asfaltos altamente modificados con polvo de neumático fuera de uso (NFU) en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja

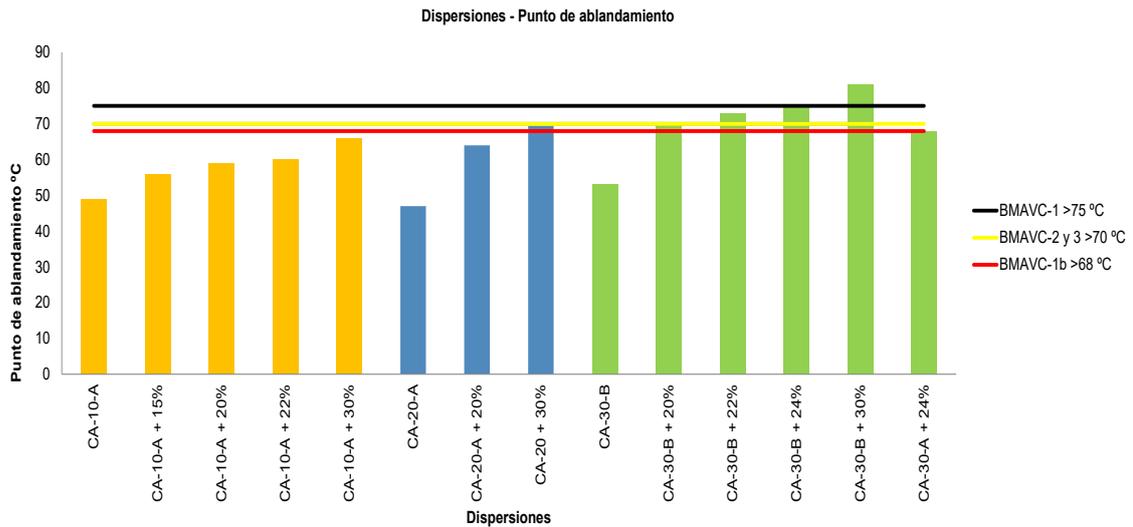


Figura 4.16. Resultados de punto de ablandamiento en todas las dispersiones realizadas y valores límites. (Fuente propia)

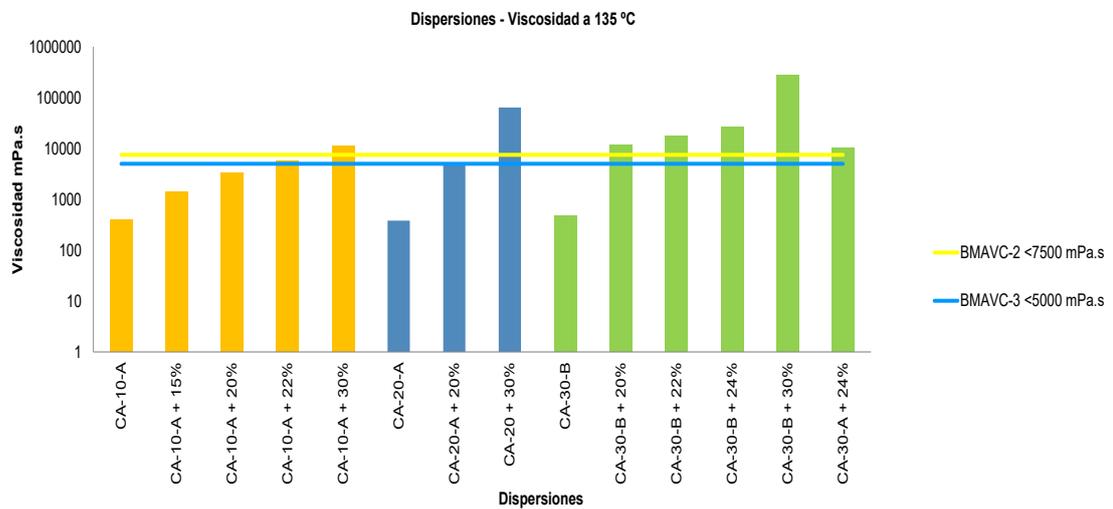


Figura 4.17. Resultados de viscosidad a 135 °C en todas las dispersiones realizadas y valores límites. (Fuente propia)

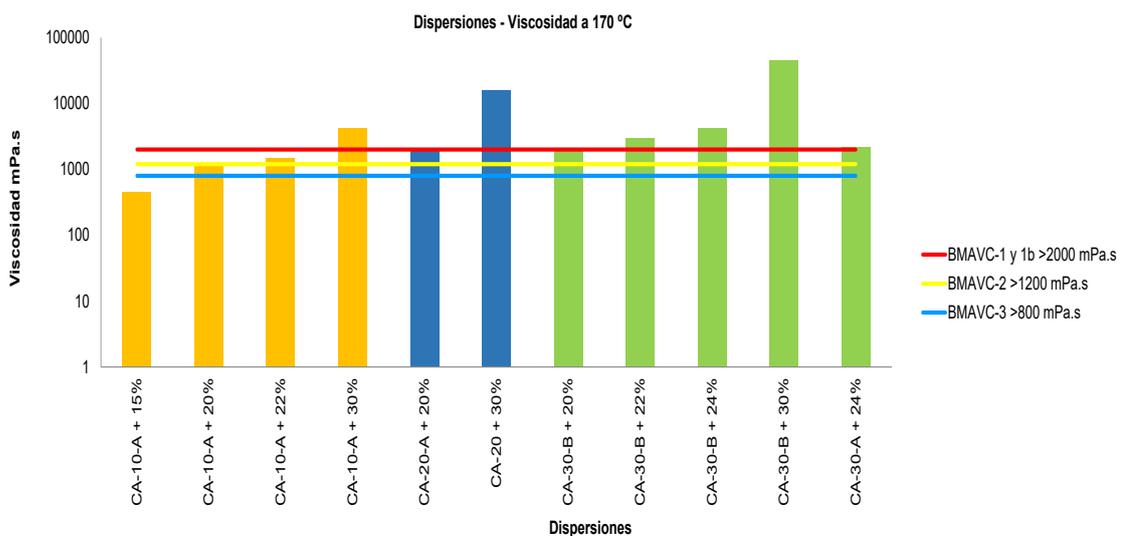


Figura 4.18. Resultados de viscosidad a 170 °C en todas las dispersiones realizadas y valores límites. (Fuente propia)

Los valores mostrados en las Figuras 4.15 a 4.18, permiten mencionar que las dispersiones realizadas con asfalto CA-30, se encuentran más cercanas a las especificaciones del BMAVC-1. Este grupo de dispersiones encuadra para la especificación de penetración, en tanto que para el punto de ablandamiento sólo dos de ellos alcanzan el valor especificado de 75 °C. Estos son el “CA-30-B + 24%” y el “CA-30-B + 30%”. Asimismo, ambos logran la viscosidad que establece para una temperatura de 135 °C y 170 °C, pero se considera que el “CA-30-B+30%” presenta valores muy superiores a dichas especificación. Por todo esto, es que el “CA-30-B+24%”, es el que cumple con estos cuatro parámetros de las especificaciones. Además, luego de las experiencias realizadas en el laboratorio de caminos de la UPM, las recomendaciones en la guía SIGNUS (2019), considerando la alternativa de utilizar el CA-30-A para incorporar una mayor tasa de NFU, se optó por la obtención de un BMAVC-1b. Este se consiguió, utilizando dicho asfalto base y una incorporación del 24 % de polvo de NFU en peso del ligante, que como se ha podido observar en las mismas figuras recién analizadas, ha logrado alcanzar los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad que recomienda la guía mencionada.

#### **4.2.5. Barrido de temperatura**

Los asfaltos base CA-30 el A y B, los de alta viscosidad obtenidos con cada uno de ellos y el modificado AM 3 fueron evaluados a diferentes mediciones reológicas. Una de ellas, fue un barrido de temperaturas crecientes, Figura 4.19, en el cual se somete a la muestra a esfuerzos oscilatorios continuos en el reómetro de corte dinámico. Con esta, es posible determinar el módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ), a diferentes temperaturas, cuya magnitud está relacionada con la resistencia total a la deformación ante una carga y la distribución relativa de la deformación, elástica y viscosa, respectivamente, como se ha descripto anteriormente.

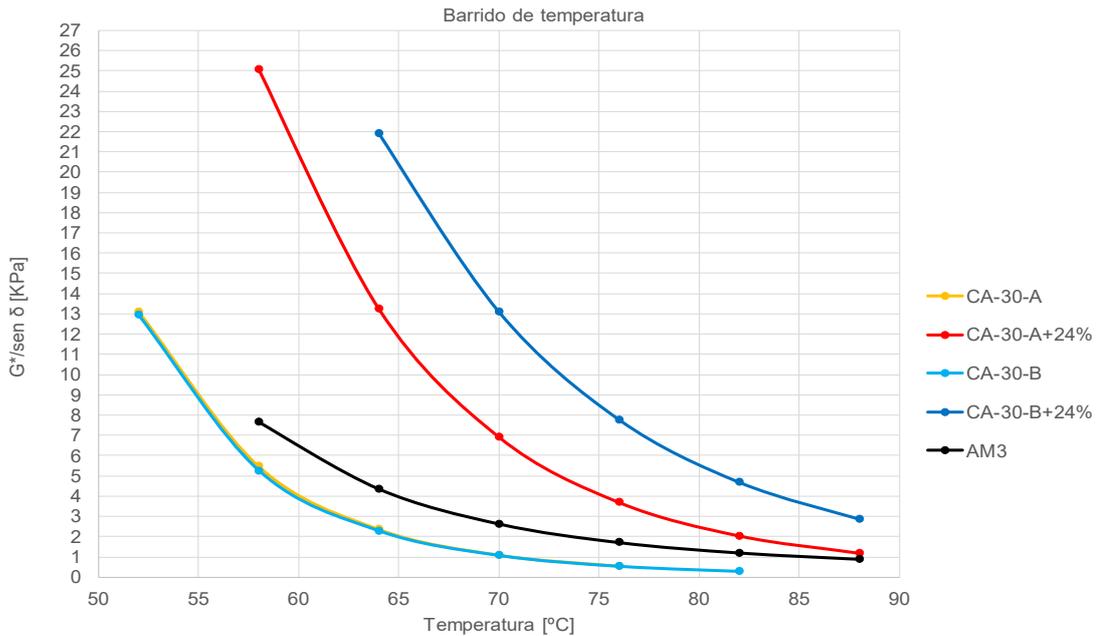


Figura 4.19. Barrido de temperatura. (Fuente propia)

Estos parámetros presentan una variación importante con cambios de temperatura y tiempo de carga. La metodología SUPERPAVE, establece que el parámetro  $G^*/\text{sen } \delta$  es el parámetro de control de la deformación permanente. Además, establece como criterio un valor de 1 kPa para determinar la temperatura máxima que alcanza para dicho parámetro. Los resultados de los ensayos de los asfaltos se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Barrido de temperatura. (Fuente propia)

Ligante/Ensayo	$G^*/\text{sen } \delta$ , 1 kPa [°C]
CA-30-A	70
CA-30-A+24%	88
CA-30-B	70
CA-30-B+24%	100
AM 3	82

En la Figura 4.19 y Tabla 4.12, se pudo observar que se ha producido una fuerte modificación del asfalto base, al incorporar el NFU, al igual que se pudo ver en los ensayos de rutina de penetración punto de ablandamiento y viscosidad antes mencionados. Además, una mayor temperatura para el CA30+24%, tanto el A como el B, para el  $G^*/\text{sen } \delta$ , evidencia un mejor desempeño elástico tanto para disminuir el ahuellamiento, como para estimar que aportará capacidad de resistir a la propagación de fisuras.

#### 4.1.1. Barrido de amplitud lineal

La prueba LAS, conforme a la norma AASHTO TP-101 (2014), se emplea para evaluar el daño por fatiga en ligantes asfálticos. La configuración de la prueba implica el uso de placas paralelas con un diámetro de 8 mm y un espacio de 2 mm entre ellas, Figura 4.20.

El procedimiento de la prueba comprende dos fases distintas. En la primera fase, se caracteriza la muestra mediante un barrido de frecuencia en el intervalo de 0,2 a 30 Hz, aplicando una deformación de corte específica del 0,1 %. Este paso tiene como objetivo principal caracterizar el material sin sufrir daños aparentes. La segunda fase implica someter la muestra a deformaciones crecientes. Esta etapa se lleva a cabo a una frecuencia constante de 10 Hz, con un aumento gradual de deformaciones específicas que varía desde el 0,1 % hasta el 30 %. En cada ciclo de carga, se registra la máxima tensión asociada con la deformación impuesta, junto con el ángulo de fase correspondiente. El procedimiento estandarizado propone el incremento de deformaciones en un lapso de 310 segundos. Esta determinación se realizó para los ligantes adoptados para la elaboración de las mezclas asfálticas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.21.



Figura 4.20. Geometría utilizada para prueba LAS. (Fuente propia)

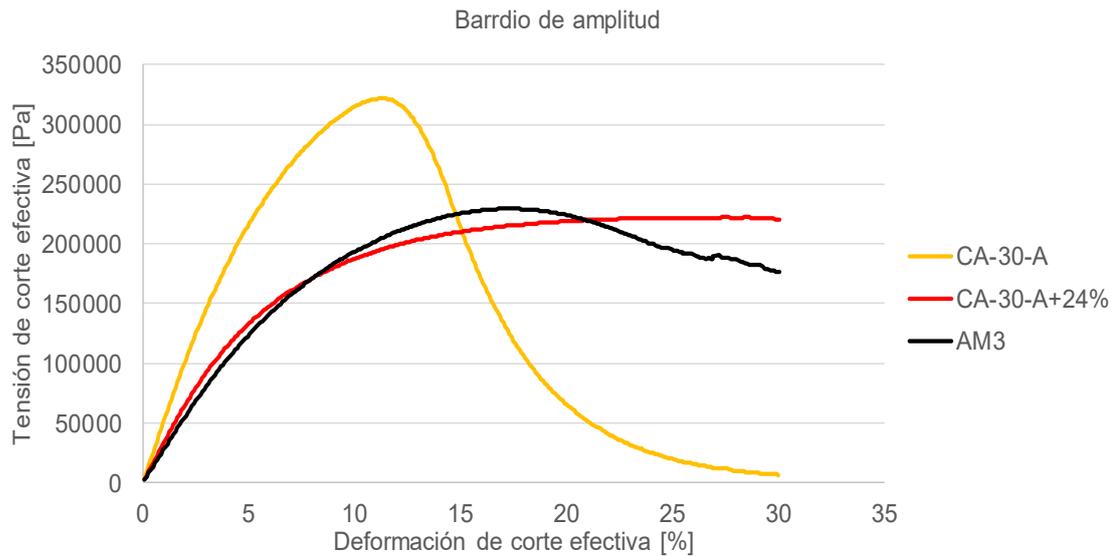
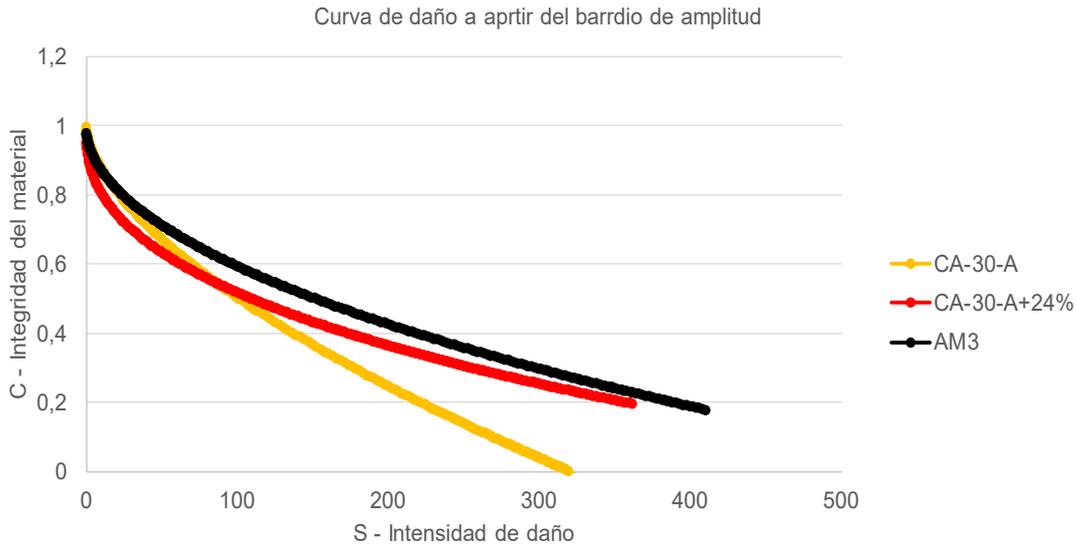


Figura 4.21. Gráfico de barrido de amplitud. (Fuente propia)

En la Figura 4.21 la muestra CA-30, a pesar de obtener un pico de tensión mayor, alcanza este valor prematuramente y cae bruscamente respecto a los otros dos asfaltos que muestran una curva más estable. Además, el CA-30-A+24% requiere una deformación mayor hasta alcanzar un descenso en dicha curva. Por esto, se puede apreciar que el área bajo la curva es mayor en comparación con los otros dos ligantes. Esto puede ser vinculado a la energía necesaria para alcanzar la rotura del material, por lo que se deduce que este ligante requiere una cantidad mayor de energía para llegar al inicio del descenso de la curva, falla del material, en comparación con los otros.

#### 4.2.6. Determinación de curva de integridad del material vs intensidad del daño

Los datos proporcionados en el barrido de amplitud y con la metodología mencionada en el apartado 4.1.5, se han calculado los parámetros del modelo según el S-VECD, para evaluar el coeficiente  $\alpha$  de integridad del material y los coeficientes C1 y C2 de la curva de daño. Estos coeficientes, permitieron construir las curvas C-S de integridad del material en función del daño acumulado, Figura 4.22.



**Figura 4.22. Gráfico C-S. (Fuente propia)**

El efecto de una curva más estable en el asfalto CA-30-A+24%, Figura 4.21, se contempla en las curvas C-S que evalúan el trabajo interno realizado por el material. También, el desplazamiento de los picos de tensión en las muestras se traduce en grandes desplazamientos en las curvas C-S. Además, se puede ver un mejor desempeño que el ligante base, CA-30-A, y similar al AM 3.

#### 4.2.7. Cálculo de cantidad de ciclos a falla vs deformación

Los valores obtenidos para elaborar la gráfica C-S, Figura 4.22, y continuando con la metodología descrita en el apartado 4.1.5, se determinó la cantidad de ciclos a falla en función de la deformación máxima específica del material, Figura 4.23. El criterio de falla adoptado para su evaluación, es una reducción del 35 % de la integridad inicial como se mencionó antes, para desarrollar el modelo visto en la ecuación 4.2.

La Figura 4.23, muestra que el CA-30-A+24% admite una mayor cantidad de ciclos hasta la falla, siendo esto más significativo hasta una deformación del orden del 2 %. Este comportamiento se ha considerado relevante, ya que se ha evidenciado en el mejor desempeño a propagación de fisuras en las mezclas elaboradas con dicho asfalto, solicitadas a cargas cíclicas dinámicas, que se desarrolla en el capítulo 5.

Asfaltos altamente modificados con polvo de neumático fuera de uso (NFU) en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja

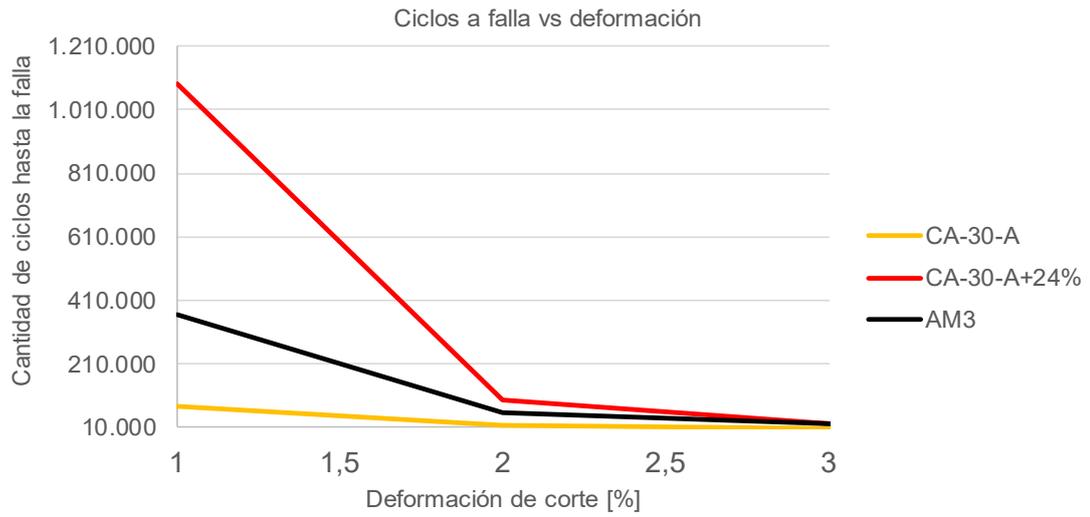


Figura 4.23. Gráfico cantidad de ciclos a falla en función de la deformación. (Fuente propia)

### 4.3 Referencias

AASHTO T315 (2022). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos. pp 32.

AASHTO TP101 (2014) Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos. pp8.

Agnusdei, J., losco, O. (1999). Durabilidad de Mezclas Asfáltica Preparadas con Ligante Modificados con Polímeros. Comisión de Investigaciones Científicas. LEMIT.

Asphalt Institute (2003). Superpave. Performance graded asphalt binder specification and testing (3rd ed.). Lexington, USA. pp 70.

Asphalt Institute (2006). Technical Bulletin. Laboratory mixing and compaction temperaturas. Lexington, Kentucky USA. 5 p.

ASTM D2493 (2001). Standard viscosity-temperature chart for asphalts. International Standards worldwide. pp 5.

Bahia, H. (2009). Modeling of asphalt binder rheology and its application to modified binders. In Y. R. Kim, Modeling of asphat concrete (p. 11). McGraw- Hill.

Botasso, G. (2018). Dispersiones de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso. Su empleo en mezclas asfálticas densas y antiderrapantes. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-87-5. pp 268.

CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España. Madrid, España. ISBN: 978-84-7790-450-2. pp 63.

Chiman, A. (2004). Evaluación de las Propiedades de Asfaltos Modificados con Polímeros Activados. Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector de Transporte e Industrial Corasfaltos. Medellín, Colombia, pp. 28-32

Garnica Anguas P. (2004). Comportamiento de mezclas asfálticas

modificadas con SBR Publicación Técnica No 254 Sanfandila, Qro, Instituto Mexicano del Transporte. D.F. México, pp. 85-90.

Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., and Bahia, H. (2011). Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record*, 2207(1), pp. 99-106.

IRAM 6576 (2004). Asfaltos. Determinación de la penetración utilizando un penetrómetro de aguja. *Asphalts. Determination of penetration using penetration apparatus with needle*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.

IRAM 6596 (2018). Asfaltos modificados con polímeros para uso vial. Clasificación y requisitos. *Polymer modified asphalts for use in pavement construction. Classification and requirements*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.

IRAM 6673 (2012). Asfalto con inclusión de caucho reciclado por vía húmeda para uso vial. Clasificación y requisitos. *Asphalt with rubber recycled by wet way for road. Classification and requirements*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 10.

IRAM 6830 (2011). Asfaltos. Determinación de la recuperación elástica por torsión. *Asphalts. Determination of torsional elastic recovery*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 16.

IRAM 6832 (2010). Asfaltos. Determinación de la recuperación elástica por tracción. *Asphalts. Determination of elastic recovery by thrust*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 8.

IRAM 6835 (2020). Asfaltos para uso vial. Clasificación por viscosidad – Requisitos. *Asphalt for pavements. Classification by viscosity. Requirements*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.

IRAM 6837 (2016). Asfaltos. Determinación de la viscosidad rotacional. *Asphalts. Determination of rotational viscosity*. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 13.

IRAM 6841 (2011). Asfaltos para uso vial. Determinación del punto de ablandamiento. Método del anillo y la esfera. *Asphalts for pavements*.

Determination of softening point. Ring and ball method. Instituto argentino de normalización y certificación. Argentina. pp 12.

Navarro, L. (2004). Separación y caracterización de resinas y asfaltenos provenientes del crudo castilla. Ministerio de Transporte de Perú. Lima, Perú, pp. 234-245.

Órdenes Circulares 21/2007 y 21bis/2009. Ministerio de Fomento y Ministerio de Ambiente. Madrid, España.

Rowe, G. (2012). RHEOBIT: Rheological concepts. Part 1. 13. Lexington, USA.

Saboo, N. (2020). New damage parameter for fatigue analysis of asphalt binders in linear amplitude sweep test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), art. 04020126.

Schapery, R.A., Park, S.W. (1999). Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II—An approximate analytical method. *International Journal of Solids and Structures*, 36(11), pp. 1677-1699.

Segura, A., Gallego, J., Botasso, G., Raggiotti, B. (2022). Congreso: Rubberized Asphalt - Asphalt Rubber RAR2022. Evaluation Of Anti-Reflective Cracking Mixtures Made With High Nfu Asphalts. Málaga, España. Locape - Artes gráficas, Lda. Portugal. ISBN: 978-989-53684-0-2. pp 11.

SIGNUS (2017). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso. Madrid, España. ISBN 978-84-697-2998-4. pp 82.

SIGNUS (2019). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema integrado de gestión de neumáticos usados. Madrid, España. ISBN: 13 978-84-616-9263-7. pp 35.

Transportes III (2019). Cátedra Transportes III. Material de apoyo. Escuela de ingeniería civil. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura. pp 426.

UNE-EN 13302 (2003). Determinación de la viscosidad del betún usando un viscosímetro rotacional. Determination of viscosity of bitumen using a rotating spindle apparatus. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 10.

UNE-EN 13398 (2010). Determinación de la recuperación elástica de los betunes modificados. Determination of the elastic recovery of modified bitumen. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 12.

UNE-EN 1426 (2007). Determinación de la penetración con aguja. Determination of needle penetration. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 18.

UNE-EN 1427 (2007). Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola. Determination of the softening point. Ring and Ball method. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 18.

Wang, C., Castorena, C., Zhang, J., and Richard-Kim, Y., (2015). Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup2), pp. 125-148.

Yildirim, Y. (2006). Evaluation of viscosity values for mixing and compactation temperatures". *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 18, No. 4 (July-August), pp. 545-553. USA.

Yue, M., Yue, J., Wang, R., and Xiong, Y., (2021). Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit and polymers using linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*, 289, art. 123054.

Zapata, I., Rebollo, O., Rivera, J., Botasso, G.,. (2023). Fatigue evaluation of asphalts highly modified with recycled tire rubber. *DYNA. Revista de la facultad de minas. Universidad nacional de Colombia. Medellin, Colombia. ISSN 0012-7353, Vol. 90, N°. 226, 2023, págs. 139-145.*



# Capítulo 05: Mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja

---

## RESUMEN

En este capítulo se presenta una breve introducción a los sistemas de retardo de fisuras y descripción de las mezclas abordadas en esta tesis. Posteriormente, se mencionan los agregados utilizados y se recorren las diferentes granulometrías analizadas y sus referencias, para adoptar una curva granulométrica para cada una de las tres mezclas a evaluar. Luego, se establece las designaciones de las diferentes mezclas en función de los tres tipos de granulometrías adoptadas y los diferentes ligantes utilizados. Asimismo, los ensayos y sus resultados en el proceso de dosificación de las mismas, tanto para parámetros mecánicos, volumétricos y como la medición del ahuellamiento, módulo y resistencia a daños por humedad inducidos. También, la valoración de dos mezclas en la experiencia realizada en laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid, en cuanto a parámetros mecánicos, volumétricos, módulo y propagación de fisura en probeta semicircular a dos temperaturas. Además, los resultados y evaluación de la propagación de fisura con el modelo de reflejo de las mismas adoptado, en las tres mezclas estudiadas. En estas últimas, para la realización de los ensayos mencionados, se han elaborado aproximadamente 900 kg de ellas, durante el transcurso de esta tesis. Para ello, el acopio de todo el material fue previsto antes del inicio del desarrollo experimental. Asimismo, se enfatiza en que el propósito de este estudio es examinar cómo responden las nuevas propuestas tecnológicas en mezclas asfálticas frente a la fisuración refleja, utilizando un ligante modificado con una alta cantidad de polvo de NFU y llevando a cabo una comparación relativa entre ellas. En consecuencia, el enfoque de la evaluación se ha centrado en un análisis tecnológico, no pretendiendo realizar una valoración a través de un método indirecto para determinar la propagación de la fisura, como lo sería un estudio analítico de modelización. Además, no se han realizado mediciones de apertura de fisura mediante elementos que registren deformaciones para relacionarlas con una determinación indirecta del crecimiento de la fisura. Por último, relaciones y tendencias analizadas entre los resultados de ciclos a rotura de las probetas del

modelo, con parámetros de las mezclas como su módulo, la relación entre la cantidad de filler, asfalto y vacíos, y las características y determinaciones reológicas del asfalto con NFU obtenidas en el capítulo 4.

## 5.1 Granulometrías y mezclas usadas para retardo de fisuras

El deterioro prematuro de los pavimentos debido a la aparición de fisuras reflejas, por rotura rápida de las capas colocadas para tal fin, ocasiona reiteradas tareas de mantenimiento en las carpetas de rehabilitación colocadas sobre ellas, generando incrementos en los costos de conservación de estas estructuras. En búsqueda de mejorar esta situación, se han interpuesto geogrillas y geosintéticos en dichas capas, que pueden implicar mayores costos. También capas de absorción de tensiones Stress Absorbing Membrane Interlayer (S.A.M.I.), que es un material aplicado en la superficie existente del pavimento antes de colocar la capa de superficial o de refuerzo.

Las capas de sellado con agregados, también conocidas como chip seals, son una capa SAMI que consiste en una capa gruesa de ligante, generalmente modificado, y se esparce agregados de tamaño único que se introducen en ligante a través de sucesivas pasadas con un rodillo neumático. Este sistema no evita ni reducen los movimientos en las grietas y juntas, pero disipan esos movimientos y retrasando su aparición en la superficie.

Existen otras técnicas como una capa intermedia flexible de espesor alrededor de 25 mm, con agregados finos y asfalto modificado, seguida de una capa de granulometría continua o discontinua también con el mismo asfalto. También otras, como una capa compuesta que combina un geotextil y una S.A.M.I., y consta de una mezcla asfáltica entre medio de dos geotextiles. Además, otras como las capas intermedias elaboradas con asfalto caucho, que han presentado mejores desempeños frente a otros sistemas.

Por otro lado, se pueden mencionar capas amortiguadoras para mitigar fisuras reflectantes, las capas de agregado triturado no ligados y las mezclas asfálticas en caliente de granulometría abierta (AAPTP, 2009).

Por otra parte, las mezclas más utilizadas para esto, han sido las arenas-asfalto (AA) de granulometría continua y que pueden ser elaboradas con asfalto

convencional. Además, permitían corregir deterioros superficiales, restituir gálibos, entre otros, pero en reiteradas ocasiones han fallado de manera temprana frente a la propagación de fisuras. Se genera así la necesidad de mejorar el desempeño de esta mezcla, para lo cual se las han elaborado a partir de asfaltos modificados. En ese sentido en el presente estudio se ha evaluado el desempeño de la mismas, a partir de una elaborada con asfalto convencional (AA CA30), otra fabricada con modificado con polímero virgen (AA AM3) y otra con NFU (AA NFU). Esta última presenta como dificultad que, dada su granulometría continua, alto contenido de finos y su fabricación con un asfalto con elevada tasa de NFU, no posee una adecuada cantidad de vacíos para alojar dicha proporción de NFU, lo cual se traduce en una menor densidad y vacíos. Esto trae aparejado una disminución de su capacidad de resistencia al ahuellamiento y frente a las otras dos AA, un mejor desempeño a la propagación de fisuras. En la búsqueda de alternativas para mejorar estas dos características que se tensionan, el estudio de antecedentes al respecto y considerar una mezcla que posea una mayor capacidad de alojar la alta tasa de NFU, se evalúan mezclas con granulometría discontinua y que deben ser elaboradas con asfalto modificado. Estas presentan un menor ahuellamiento y poseen una mayor proporción de vacíos capaces de albergar al NFU. En esa línea, se plantea un estudio de mezclas de discontinuidad creciente en la búsqueda de observar lo antes mencionado. Por ello, se evaluaron un microaglomerado asfáltico en caliente (MAC), uno elaborado con NFU (MAC NFU) y otro con polímero virgen (MAC AM3). También, avanzando en una mayor discontinuidad, otra propuesta por el manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas (CEDEX, 2007) de España (CEDEX), una elaborada con NFU (CEDEX NFU) y otra con polímero virgen (CEDEX AM3).

Los agregados utilizados son de un rango de tamaños de 0 a 3 mm, 0 a 6 mm y 6 a 12 mm, Figura 5.1, de estos se realizaron sus respectivas granulometrías, que se puede ver en Tabla 5.1, y se utilizaron para la conformación de las diferentes curvas granulométricas de las distintas mezclas estudiadas. Estas, surgieron como consecuencia de las experiencias realizadas y las bibliografías (Borreli, 2020; Plan de pavimentación 1200 cuerdas, 2001; Uguet et al., 2020; Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F, 2017; SIGNUS, 2017; Segura et al., 2018; Segura

et al., 2022), siendo una arena asfalto (AA), un microaglomerado asfáltico en caliente (MAC) y otra (CEDEX) a partir de curvas límites del manual del centro de estudios y experimentación de obras públicas de España (CEDEX, 2007) que las menciona para tal fin.



Figura 5.1. Ensayo de granulometría. a y b) Cuarteo. c) Tamizado. (Fuente propia)

Tabla 5.1. Resultados de granulometría de agregados utilizados. (Fuente propia)

Tamiz		Agregado - Granulometría			
Número [N]	Abertura [µm]	0-3 [%]	0-6 [%]	6-12 [%]	6-20 [%]
3/4	19100	100,00	100,00	100,00	98,30
1/2	12700	100,00	100,00	100,00	52,70
3/8	9500	100,00	100,00	83,10	30,10
4	4760	100,00	95,00	3,40	3,10
8	2400	88,30	64,00	1,00	2,50
30	590	41,80	32,80	0,70	2,20
50	300	31,50	24,50	0,50	2,20
200	74	12,50	8,30	0,40	0,10

### 5.1.1. Arena - asfalto

En el caso de la AA, se analizaron diferentes curvas límites y casos de aplicación, con el fin de encontrar una curva a utilizar en la experiencia. En la Figura 5.2, se puede ver en color verde las curvas límites “Uruguay” que fueron utilizadas en la aplicación de un caso de rehabilitación de una ruta de acceso en Montevideo Uruguay (Borrelí, 2020). Asimismo, las curvas celestes “La Plata” corresponden a curvas límites, utilizadas en el pliego de especificaciones técnicas para un plan de pavimentación, de dicha ciudad (2001). Luego la curva en amarillo “Bs. As.” pertenece a un caso de aplicación de una arena asfalto como sistema antirreflejo de fisura en la provincia de Buenos Aires Argentina (Uguet et al., 2020). Por último, la curva en negro “UPM” es un mortero bituminoso utilizado en experiencias en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid. La curva roja “AA” es la utilizada para la elaboración de las arenas asfalto para la experiencia. Esta fue adoptada luego de intentar encuadrar dentro los límites, curvas verdes “Uruguay”, comparando la similitud con los casos antes mencionados “Bs. As. y UPM” y

considerando los límites de las curvas celestes, “La Plata”. Se puede observar que estas últimas, contiene a la mayoría de los puntos de las otras curvas. Es por todo esto y teniendo en cuenta la granulometría de los áridos locales disponibles, se conformó la curva roja propuesta, siendo elaborada a partir de un 88 % del agregado 0 a 3 mm y un 12 % del 6 a 12 mm.

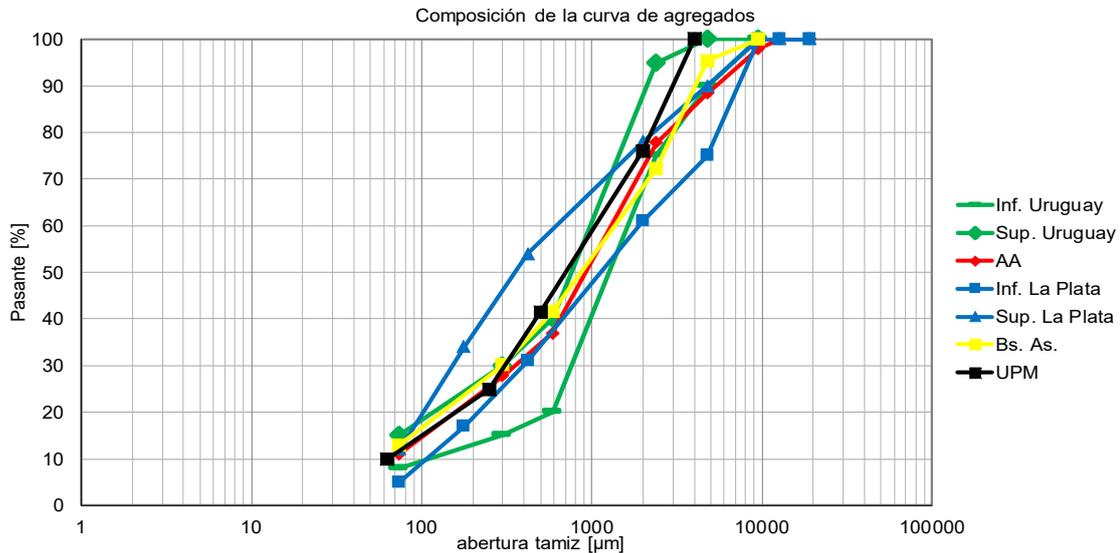


Figura 5.2. Curvas granulométricas de AA analizadas y adoptada. (Fuente propia)

### 5.1.2. Microaglomerado asfáltico en caliente

En cuanto al MAC se procedió de manera similar al caso anterior. En la Figura 5.3, se puede ver de color negro las curvas límites “MAC F10”, las mismas corresponden al pliego de especificaciones de la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina (2017). También la de color amarillo “SIGNUS”, es mencionada por la Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático (SIGNUS, 2017), para uso como retardante de fisuras reflejas. Asimismo, la “SIGNUS modificada”, en color azul, que corresponde a la recién mencionada, pero que fue modificada por Segura y otros (2022), en experiencias realizadas en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid. La curva verde “Propuesta: MAC F10” definida por Segura y otros (2018), elaborada con una menor cantidad de NFU y para valorar sus características superficiales. Esta curva fue la seleccionada para la realización de los MAC en la presente tesis, a partir de observar la similitud con los otros dos casos “SIGNUS y SIGNUS modificada”, que se encuentra contenida dentro de las curvas límites de color negro “MAC F10” y la posibilidad de conformarla con la granulometría de los áridos locales disponibles. La misma se elaboró a partir de un 73 % de agregado 6 a 12 mm, un 24 % de 0 a

3 mm y un 3 % de cal.

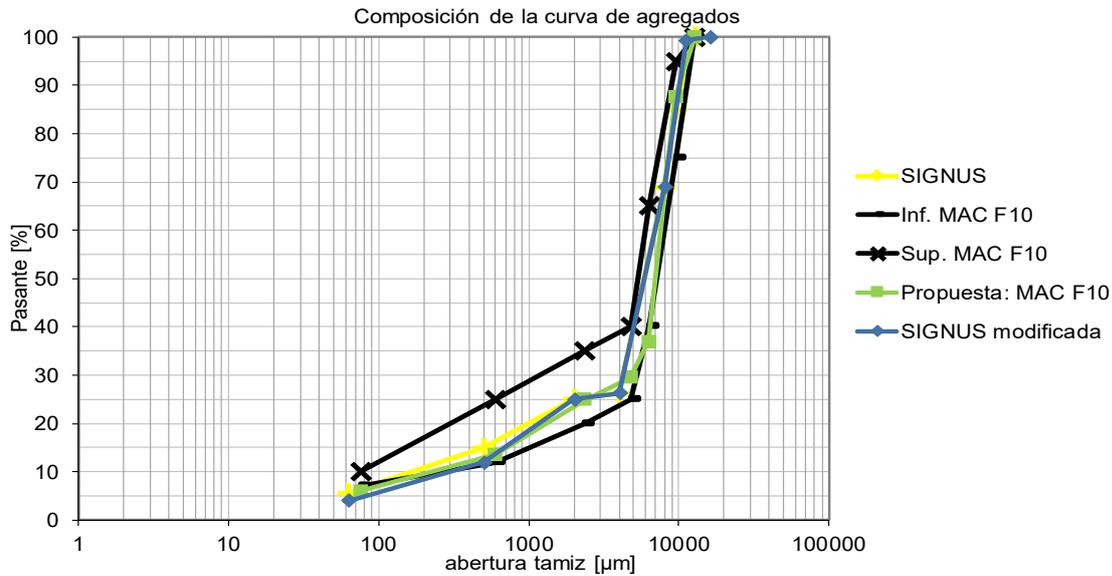


Figura 5.3. Curvas granulométricas de MAC analizadas y adoptada. (Fuente propia)

### 5.1.3. Mezcla CEDEX

La tercera mezcla valorada, ha sido mencionada antes como “CEDEX” y ésta se adoptó construyéndola a partir de los límites superior e inferior del manual del centro español (CEDEX, 2017), curvas celestes “Inf. y Sup. CEDEX”, como se muestra en la Figura 5.4. Esta construcción, curva roja CEDEX, se realizó separando en fracciones por tamizado del agregado y colocar un porcentaje intermedio entre dichos límites. Esto se debió a la complejidad de obtener una

curva resultante a partir de la mezcla de otros de uso frecuente y disponibles, que encuadre dentro de los reducidos entornos de las curvas límites superior e inferior de dicho manual.

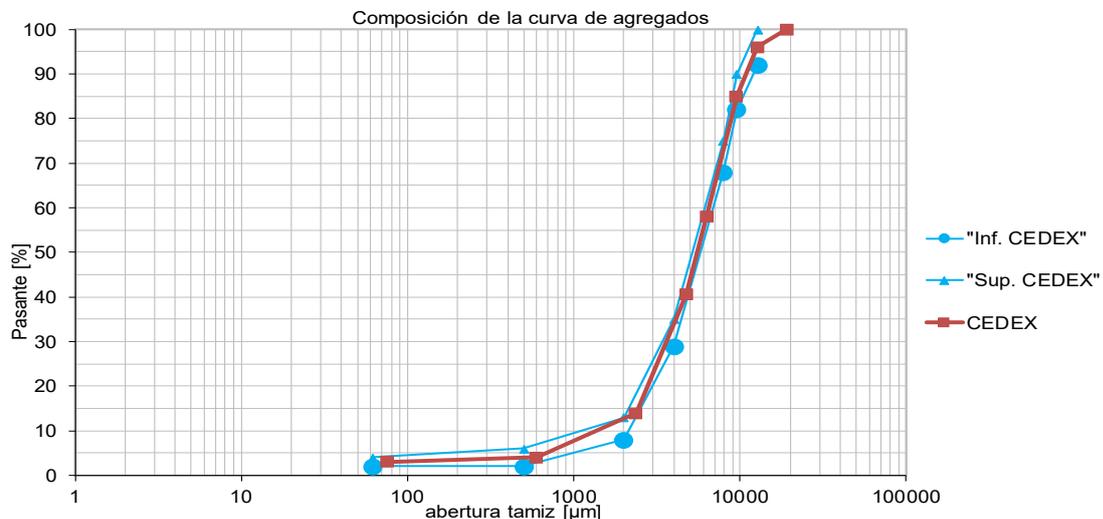


Figura 5.4. Curva granulométrica CEDEX adoptada. (Fuente propia)

#### 5.1.4. Diseño: ensayos mecánicos y volumétricos

Las mezclas que se elaboraron fueron las granulometrías antes mencionadas con los diferentes ligantes, obteniendo las combinaciones que se presentan en la Tabla 5.2.

*Tabla 5.2. Designación de mezclas asfálticas elaboradas. (Fuente propia)*

<b>Ligante/Granulometría</b>	<b>AA</b>	<b>MAC</b>	<b>CEDEX</b>
CA30-A	AA CA30	-	-
CA30-A+24%	AA NFU	MAC NFU	CEDEX NFU
AM 3	AA AM3	MAC AM3	CEDEX AM3

En cuanto a la dosificación de la cantidad de ligante a incorporar en cada una de las mezclas, fue establecido según los desarrollos y trabajos llevados a cabo anteriormente, bibliografías y buscando que los parámetros mecánicos y volumétricos se encontraran dentro de valores esperados. En este sentido se presentan los valores de referencias que se han tenido en cuenta para la AA los de Uguet y otros (2020) y Borreli (2020) Tabla 5.3, para el MAC el de SIGNUS (2017), Tabla 5.4, y para CEDEX el de Segura y otros (2022), Tabla 5.5. Asimismo, en éstas los valores de densidades, dependen de las características y procedencia de los agregados en esos países, método de compactación, cantidad de filler y contenido de ligante. Por todo esto, es que dichos valores han sido tenidos en cuenta como punto de partida en la búsqueda de la dosificación de las mezclas estudiadas. En cuanto a las dos mezclas MAC y CEDEX, también se ha tenido en cuenta lo mencionado por CEDEX (2007) respecto a que por su elevado contenido de ligante tipo BMAVC, del orden del 8 %, y granulometría discontinua, presentan una elevada resistencia a la reflexión de grietas de las capas inferiores.

Tabla 5.3. Parámetros según referencias para la AA. (Uguet et al., 2020 y Borreli, 2020)

<b>Parámetros/ Referencias</b>	<b>Un.</b>	<b>Uguet</b>	<b>Borreli</b>
Densidad aparente	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,401	2,309
Densidad máxima	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,529	2,387
Vacíos	[%]	5,1	3,26
Tipo de ligante	-	AM 3	AM 3
Porcentaje de ligante	[%]	6,8	8

Tabla 5.4. Parámetros según referencias para el MAC. (SIGNUS, 2017)

<b>Parámetros/ Referencia</b>	<b>Un.</b>	<b>SIGNUS</b>
Densidad aparente	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,283
Densidad máxima	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,387
Vacíos	[%]	4,4
Tipo de ligante	-	BMAVC-1
Porcentaje de ligante	[%]	9

Tabla 5.5. *Parámetros según referencias para CEDEX. (Segura et al., 2022)*

<b>Parámetros/ Referencia</b>	<b>Un.</b>	<b>Segura</b>
Densidad aparente	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,145
Densidad máxima	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,455
Vacíos	[%]	12,56
Tipo de ligante		BMAVC-1b
Porcentaje de ligante	[%]	9

En el modelo de reflejo de fisuras utilizado para esta tesis, se ha considerado una capa superior de rehabilitación, como se ha mostrado en el capítulo 3, en la Figura 3.30. Esta última, también ha sido diseñada y para ellos se ha considerado los límites establecidos, Tabla 5.6, en el pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en calientes tipo densos de la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina (2017). Este presenta distintos tipos de mezclas y se ha adoptado la CAC D19, Concreto Asfáltico en Caliente Densa, de tamaño máximo nominal 19 mm.

Las capas de rodamiento desempeñan una función importante en el retardo de la propagación de las fisuras reflejas. El aumento del espesor de esta capa, es un método para retrasarlas ya que dichas fisuras deben recorrer un trayecto mayor para llegar a la superficie. También, un mayor espesor, contribuye con una mayor aislación térmica de la capa inferior fisurada y sus movimientos originados por los cambios de temperatura. Asimismo, la propia composición de esta capa ya que, su granulometría, contenido y tipo de ligante como convencional o modificado, parámetros mecánicos y volumétricos, influyen en su capacidad de retardar el progreso de la fisura. En este sentido, todas estas características mencionadas son posibles de ser evaluadas considerando la variación de ellas. Sin embargo, se ha adoptado como criterio que dicha capa de rodadura sea de la del tipo mencionada anteriormente, y no modificar alguna característica, como por ejemplo realizarla con ligante modificado, a los efectos de no introducir otra variable, y poder evaluar el desempeño de la capa intermedia que ha sido el objeto de estudio de esta tesis.

Tabla 5.6. *Parámetros según referencia para CAC D19. (DNV, 2017)*

<b>Parámetros/ Referencia</b>	<b>Un.</b>	<b>DNV</b>
Estabilidad	[kN]	> 10
Vacíos	[%]	3 - 5
Vacío del agregado mineral (VAM)	[%]	> 14
Relación Betún - Vacíos (RBV)	[%]	65 - 78
Min. contenido de cal	[%]	1,00

En el proceso de dosificación se realizaron las mezclas mencionadas en la Tabla 5.2, con diferentes porcentajes de ligantes, agregados y cal. En las Tablas 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se presentan un resumen de las distintas mezclas realizadas en el proceso de dosificación de las mismas. Posteriormente estas se elaboraron, Figura 5.5, y fabricaron probetas Marshall, Figura 5.6, de cada una, siendo aproximadamente un total de 140 ejemplares para la determinación de los parámetros mecánicos y volumétricos. En cuanto a las temperaturas de mezclado y compactación en las mezclas elaboradas con CA30-A+24%, se siguió las recomendaciones de SIGNUS (2017) de 175 °C y 165 °C respectivamente. En este sentido, esas mismas temperaturas fueron las utilizadas para las mezclas MAC NFU, MAC AM3, AA NFU y AA AM3. En cuanto al AA CA30 y CAC D19, se utilizó 165 °C y 150 °C. Luego, a partir del análisis de dichos parámetros y de los valores de referencias de las Tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, se adoptó el porcentaje óptimo de ligante para cada una de las mezclas, Tabla 5.11.



Figura 5.5. Elaboración de mezcla. a) Incorporación del ligante a los agregados. b) Proceso de mezclado. (Fuente propia)



Figura 5.6. Probetas realizadas de las diferentes mezclas. (Fuente propia)

Tabla 5.7. Resumen de las mezclas MAC realizadas. (Fuente propia)

Mezcla	Un.	MAC							
		CA30-A+24%				AM 3			
Asfalto	Tipo								
	Cantidad	[%]	9	9	8,5	8	5,6	5,6	5,1
Agregado 0-3 mm	[%]	20,02	21,84	21,96	22,08	20,77	22,65	22,77	22,8
Agregado 6-12 mm	[%]	66,43	66,43	66,79	67,16	68,91	68,91	69,27	69,35
Cal	[%]	4,55	2,73	2,74	2,76	4,72	2,83	2,84	2,85

Tabla 5.8. Resumen de las mezclas CEDEX realizadas. (Fuente propia)

Mezcla	Un.	CEDEX							
		CA30-A+24%				AM 3			
Asfalto	Tipo								
	Cantidad	[%]	9	9	8,5	8	5,6	5,6	5,1
Agregados	[%]	86,45	88,27	88,76	89,24	89,68	91,57	92,05	90,15
Cal	[%]	4,55	2,73	2,74	2,76	4,72	2,83	2,84	2,85

Tabla 5.9. Resumen de las mezclas AA realizadas. (Fuente propia)

Mezcla	Un.	AA			
		CA30-A+24%	AM 3	CA30-A	
Ligante	Tipo				
	Cantidad	[%]	6,8	9	6,8
Agregado 0-3 mm	[%]	82,02	80,08	82,02	82,02
Agregado 6-12 mm	[%]	11,18	10,92	11,18	11,18

Tabla 5.10. Resumen de las mezclas CAC D19. (Fuente propia)

Mezcla	Un.	CAC D19			
		CA30-A			
Ligante	Tipo				
	Cantidad	[%]	4,8	4,8	4,6
Agregado 0-6 mm	[%]	51,41	46,65	46,75	47,22
Agregado 6-19 mm	[%]	42,84	47,6	47,7	47,7
Cal	[%]	0,95	0,95	0,95	0,48

Tabla 5.11. Porcentaje óptimo de ligante y ensayos en las mezclas asfálticas (Fuente propia)

Mezcla/Ensayo	Ligante [%]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Vacíos [%]	Estabilidad [kN]
AA CA30	6,8	2,378	3,73	9,37
AA AM3	6,8	2,363	3,53	8,83
AA NFU	9,0	2,311	2,51	7,76
MAC AM3	5,0	2,398	4,11	7,67
MAC NFU	8,0	2,358	2,84	8,31
CEDEX AM3	5,0	2,331	5,17	6,77
CEDEX NFU	8,0	2,228	6,86	3,75
CAC D19 CA30-A	4,6	2,444	3,50	9,81

En el proceso de dosificación se encontró que en las mezclas elaboradas con CA30-A+24%, se debió incorporar un porcentaje mayor de ligante, respecto a la misma pero elaborada con otro de los ligantes. Esto se ha considerado que es como resultado de que el ligante con NFU, está compuesto por un 24 % de éste, por lo que la cantidad de asfalto efectivo es menor. Además, se puede mencionar que para las AA los valores de densidades se encuentran comprendido entre las dos referencias mostradas en la Tabla 5.3 y de la misma manera los vacíos, salvo

la elaborada con CA30+24% que es menor.

En cuanto al MAC las densidades obtenidas son mayores a la de la referencia de Tabla 5.4 y los vacíos del MAC NFU es menor, posiblemente asociado a la mayor densificación lograda.

En las mezclas CEDEX, se han obtenido densidades mayores y menores vacíos respecto a la referencia de tabla 5.5, esto teniendo en cuenta que no existe para tal mezcla valores de referencia, se ha considerado una optimización de dichos parámetros.

### 5.1.5. Diseño: medición de ahuellamiento, módulo y resistencia a daños por humedad inducidos

Una vez determinados y adoptados los porcentajes óptimos de ligantes para cada una de las mezclas, se procedió a la medición del comportamiento de las mezclas al ahuellamiento, módulo y resistencia a daños por humedad inducidos. La determinación y medición del primero, se realizó en las probetas fabricadas para cada una de las mezclas, siguiendo la norma UNE-EN 12697-22 (2008), Figura 5.7.

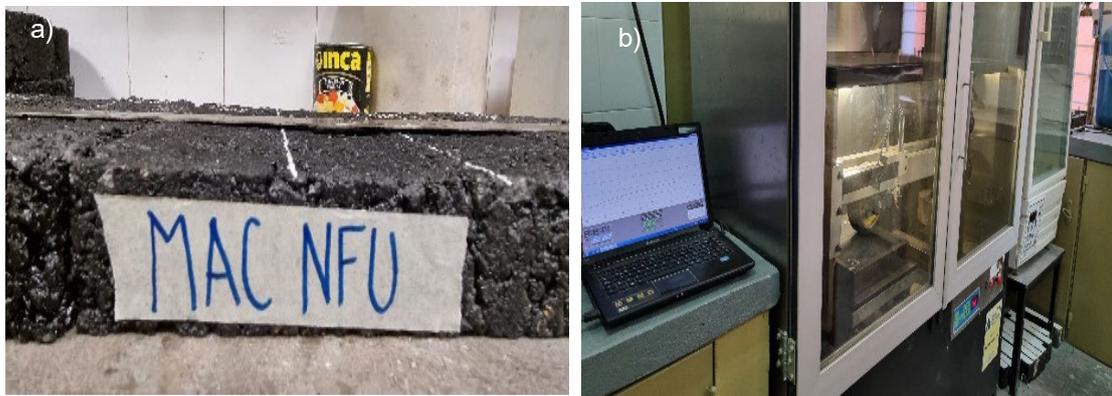


Figura 5.7. Ensayo de ahuellamiento. a) Probeta. b) Ensayo en proceso. (Fuente propia)

La determinación del módulo se realizó con el procedimiento de la norma UNE EN 12697-26 (2006), Figura 5.8.

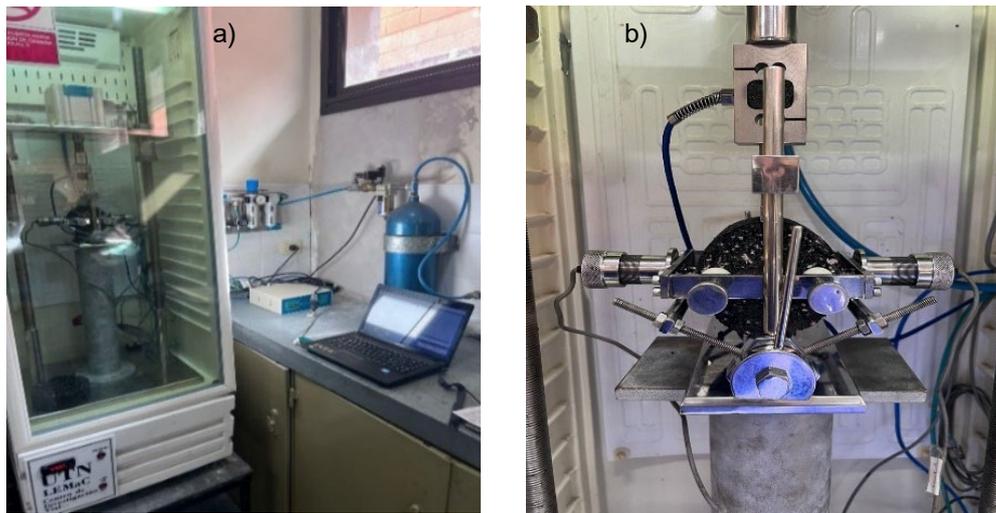


Figura 5.8. Ensayo de módulo. a) Equipo completo. b) Probeta en ensayo. (Fuente propia)

La medición resistencia a daños por humedad inducidos, se hizo siguiendo AASHTO T283 (2022) y en las Figuras 5.9 a, b y c se presentan la saturación, acondicionamiento y ensayo en prensa a tracción indirecta de las mismas, respectivamente, determinando la relación del esfuerzo tensional (TSR).

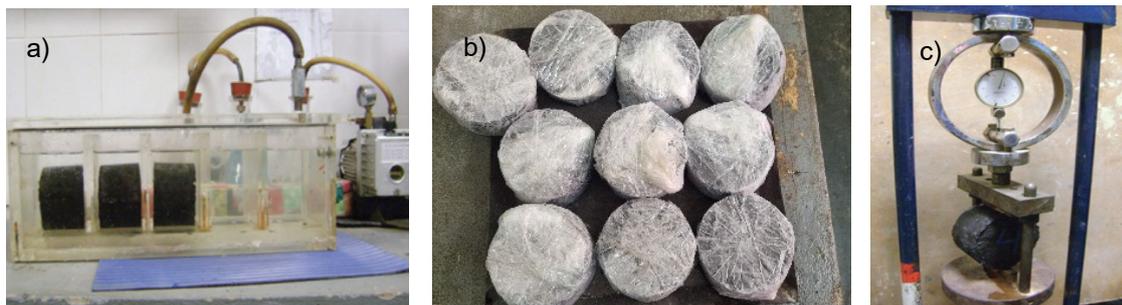


Figura 5.9. a) Acondicionamiento de probetas. b) Saturación de probetas. c) Ensayo a tracción indirecta de probetas. (Fuente propia)

Los resultados obtenidos de estos tres ensayos se presentan en la Tabla 5.12. En ésta, se muestra el valor final de ahuellamiento, pero a los efectos de poder observar la evolución del mismo durante su desarrollo, se elaboró la Figura 5.10 con las curvas correspondientes a cada uno de las mezclas.

Tabla 5.12. Resultados en las mezclas de ahuellamiento, módulo y TSR. (Fuente propia)

Mezcla/Ensayo	Ahuellamiento [mm]	TSR [%]	Módulo [MPa]
AA CA30	2,62	84	1645
AA AM3	175	91	1782
AA NFU	3,69	83	2314
MAC AM3	1,92	90	2436
MAC NFU	1,29	82	3445
CEDEX AM3	2,11	88	1362
CEDEX NFU	2,72	81	1915

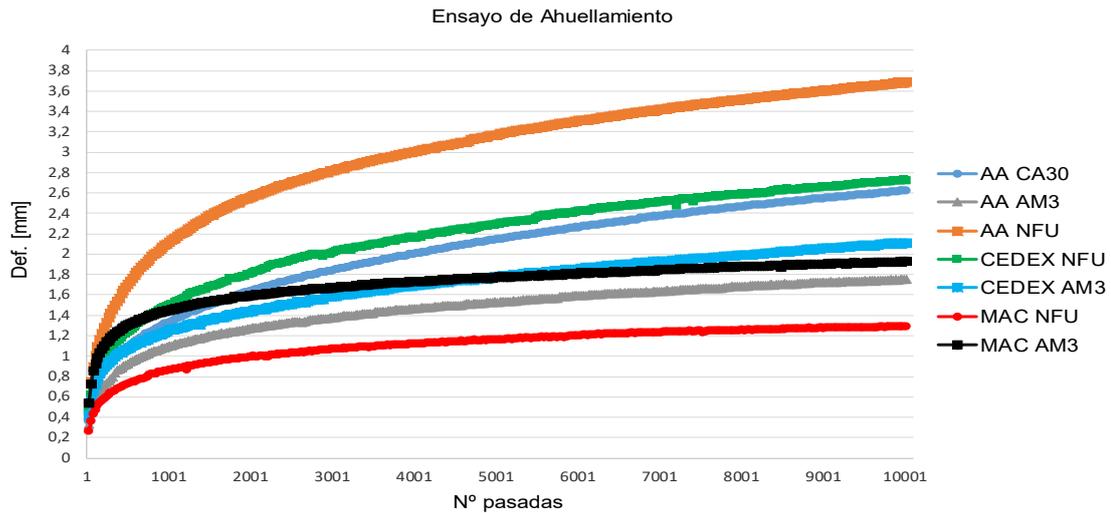


Figura 5.10. Curvas de ensayo de ahuellamiento de las mezclas estudiadas. (fuente propia)

En la AA se observa que la con NFU presenta un valor menor de densidad, vacíos y TSR, respecto de las otras dos mezclas AA. Asimismo, el menor ahuellamiento de las tres AA se obtuvo para la realizada con AM3 y el mayor módulo para la AA NFU.

En los MAC las densidades se encuentran cercanas entre el AM3 y NFU, siendo levemente inferior la mezcla con NFU, y los vacíos de éste último es menor. Esto se estima que esté relacionado con su estructura granular permitiendo alojar el NFU sin disipar la energía de compactación y también por el mayor porcentaje de ligante. Asimismo, en éste, la menor presencia de vacíos muestra un TSR con un valor aceptable y cercano al obtenido al MAC AM3. Por otro lado, el ahuellamiento en el MAC NFU es más bajo, esto puede estar relacionado a su estructura granular que interactúa con el ligante con NFU y a la elevada tasa del mismo. También en ésta, se observa que el módulo es mayor al MAC AM3.

En cuanto a CEDEX NFU, presenta una menor densidad y vacíos mayores, esto se estima sea por su granulometría, y se evidencia una menor resistencia TSR y un mayor ahuellamiento. En este último, además se observa que la curva muestra una tendencia de crecimiento. En cambio, en las otras mezclas se observa un menor crecimiento en todo el tramo último de la curva, siendo esto más evidente en los MAC. En cuanto al módulo, CEDEX NFU es la que muestra un valor mayor.

#### 5.1.6. Mezclas realizadas en laboratorio vial de la Universidad Politécnica de Madrid

En el capítulo 4 en el apartado 4.2.3, se mencionó que en el marco de la beca Movilidad profesorado argentino, del Ministerio de educación de la nación

Argentina y la Fundación Carolina de España, se realizó una estancia doctoral de tres meses en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en el laboratorio vial. Durante la misma, se desarrolló un proyecto de investigación, en el que en su inicio se trabajó con la elaboración del asfalto con incorporación de altas tasas de NFU y luego, con éste, en la elaboración de mezclas asfálticas. En este apartado se muestran, de éstas últimas, los trabajos y resultados realizados en dicha estancia.

Los agregados utilizados han sido los disponibles en el laboratorio de la UPM. Luego se procedió a componer y adoptar las curvas granulométricas de tres tipos diferentes de mezclas, para luego ser evaluadas. Estas, surgieron como consecuencia de las experiencias realizadas por dicho laboratorio, Figura 5.11. La curva CEDEX, corresponde a la misma mencionada en el apartado 5.1.3. La SIGNUS modificada, corresponde a la curva propuesta por SIGNUS como retardo de fisuras, pero que en dicha estancia la dirección de dicho laboratorio, recomendó la modificación en algunos de los porcentajes de pasantes en algunos tamaños. Por último, la curva referencia, se obtuvo a partir de considerar los husos granulométricos de las mezclas BBTM 11A y BBTM 11B del pliego de prescripciones generales para obras de carreteras y puentes (PG-3, 2014).

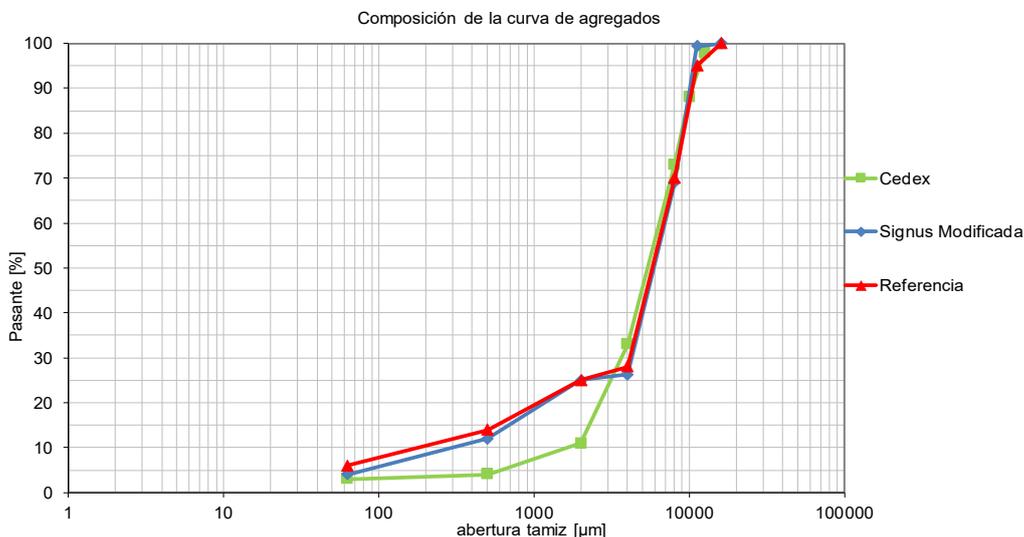


Figura 5.11. Granulometrías de las mezclas estudiadas en la estancia en UPM. (Fuente propia)

En cuanto a la dosificación de la cantidad de ligante a incorporar, éste fue establecido según los desarrollos y trabajos llevados a cabo por la UPM. Posteriormente, se prosiguió con la preparación de los agregados, Figura 5.12, la fabricación de 36 probetas Marshall, como se muestra en Figura 5.13 y 12 probetas

en compactador giratorio como se observa en Figura 5.14 a. Estas fueron aserradas quedando en dos mitades, Figura 5.14 b.



Figura 5.12. Preparación de agregados para probetas Marshall en UPM (Fuente propia)



Figura 5.13. UPM. a) Llenado de moldes. b) Compactación Marshall. c) Determinación densidad Marshall. d) Determinación densidad máxima. (Fuente propia)

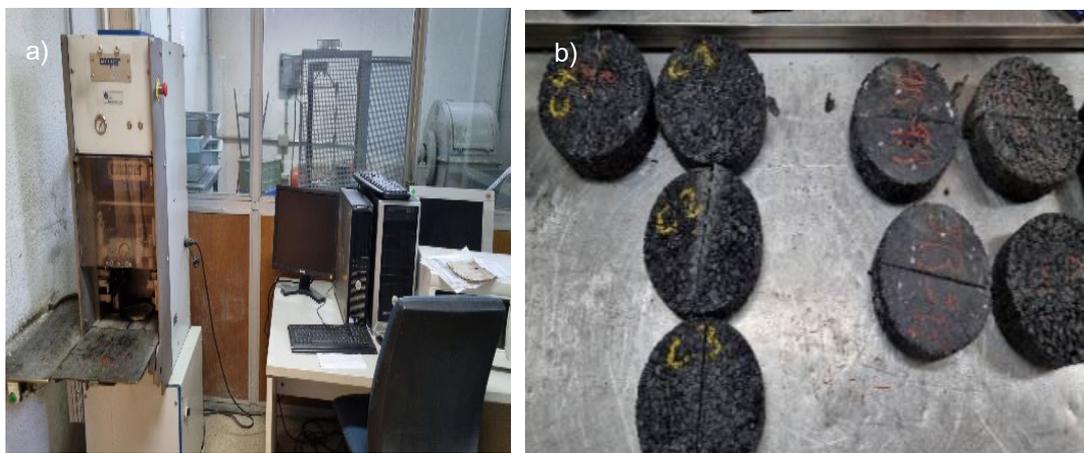


Figura 5.14. UPM. a) Elaboración probetas semicirculares. b) Probetas aserradas en la mitad (Fuente propia)

Se moldearon probetas Marshall y se utilizaron para la determinación de la densidad Marshall, máxima y cantidad de vacíos, de acuerdo a la norma UNE-EN 12697-5-6-8 (2007). También con ellas se determinó la sensibilidad al agua según norma UNE-EN 12697-12 (2006), ver Figura 5.15, y la determinación del módulo siguiendo la norma UNE-EN 12697-26 (2006), ver Figura 5.16.

El ensayo a propagación de la fisura mediante flexión de una probeta

semicircular se realizó en 24 ejemplares de este tipo, Figura 5.17, para ser ensayadas a dos temperaturas. Las mismas se construyeron a partir de 12 probetas de diámetro 150 mm elaboradas en el compactador giratorio.

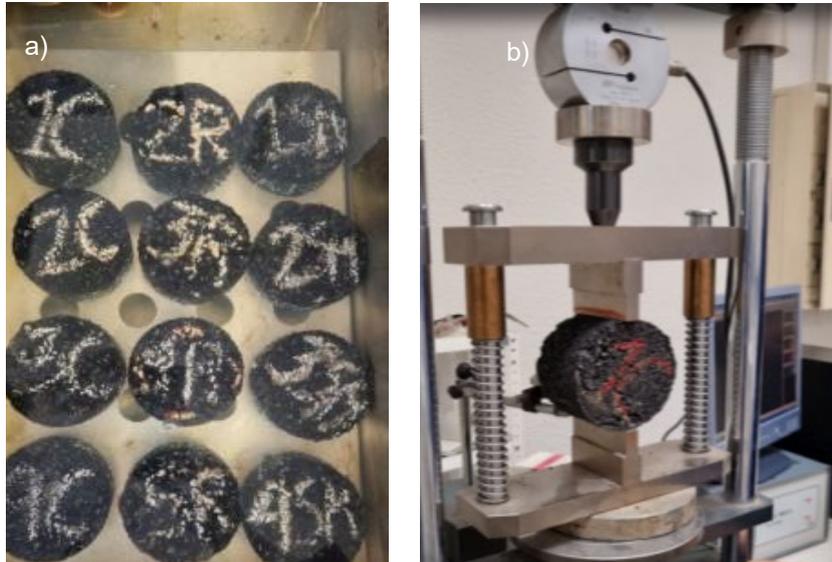


Figura 5.15. Ensayo sensibilidad al agua en UPM. a) Acondicionamiento. b) Ensayo. (Fuente propia)



Figura 5.16. Ensayo módulo en UPM. a) Probeta en ensayo. b) Pantalla de software y resultados. (Fuente propia)

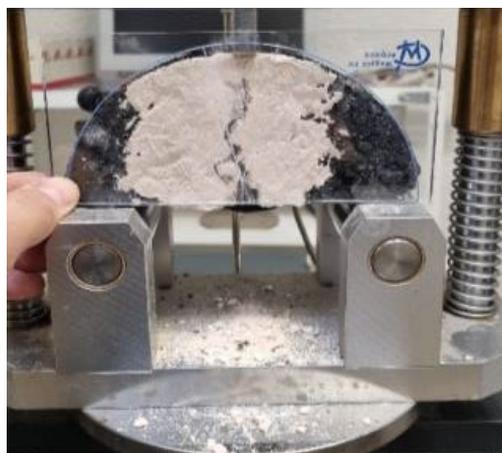


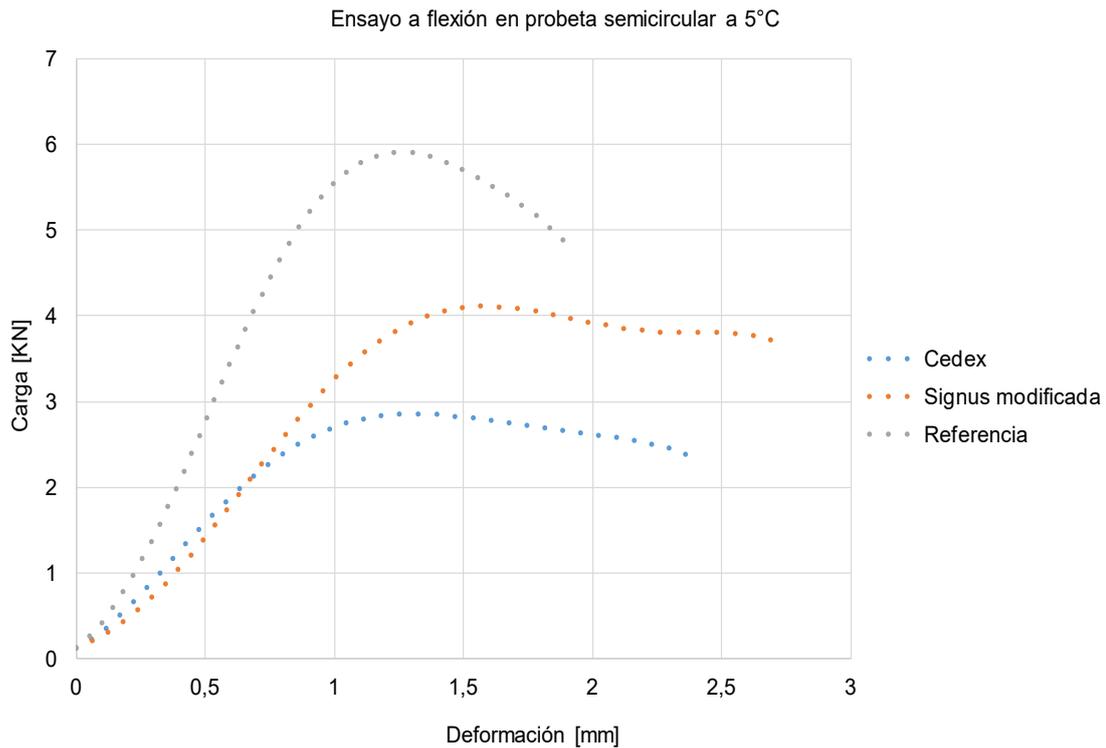
Figura 5.17. Ensayo propagación de la fisura mediante ensayo a flexión de una probeta

*semicircular en UPM. (Fuente propia)*

Los resultados obtenidos en las mezclas se presentan en la Tabla 5.13. En las Figuras 5.18 y 5.19 los gráficos de la valoración de probetas semicirculares a propagación de fisura mediante ensayo a flexión 5 °C y 20 °C, respectivamente. En cada uno de ellos se muestra la curva de regresión obtenida para el conjunto de las cuatro probetas semicirculares realizada para cada mezcla y temperatura.

*Tabla 5.13. Resultado de ensayos en mezclas asfálticas. (Fuente propia)*

Ensayo	Un.	Cedex	Signus modificada	Referencia
Tipo de ligante		BMAVC 1b	BMAVC 1b	PMB 45/80-65
Ligante en mezcla	[%]	9,0	9,0	5,6
Densidad Marshall	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,145	2,3003	2,286
Densidad máxima	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,453	2,3960	2,533
Vacíos	[%]	12,56	4,0	9,75
ITSd	[MPa]	0,87	1,32	1,60
ITSw	[MPa]	0,64	1,26	1,42
Sensibilidad al agua	[%]	73,5	95,5	88,8
Módulo: 20°C- 2,1 Hz	[MPa]	1238	2888	3108



*Figura 5.18. Curvas de regresión de resultados a propagación de la fisura mediante flexión, de cuatro probetas semicirculares. Temperatura de ensayo: 5 °C. (Fuente propia)*

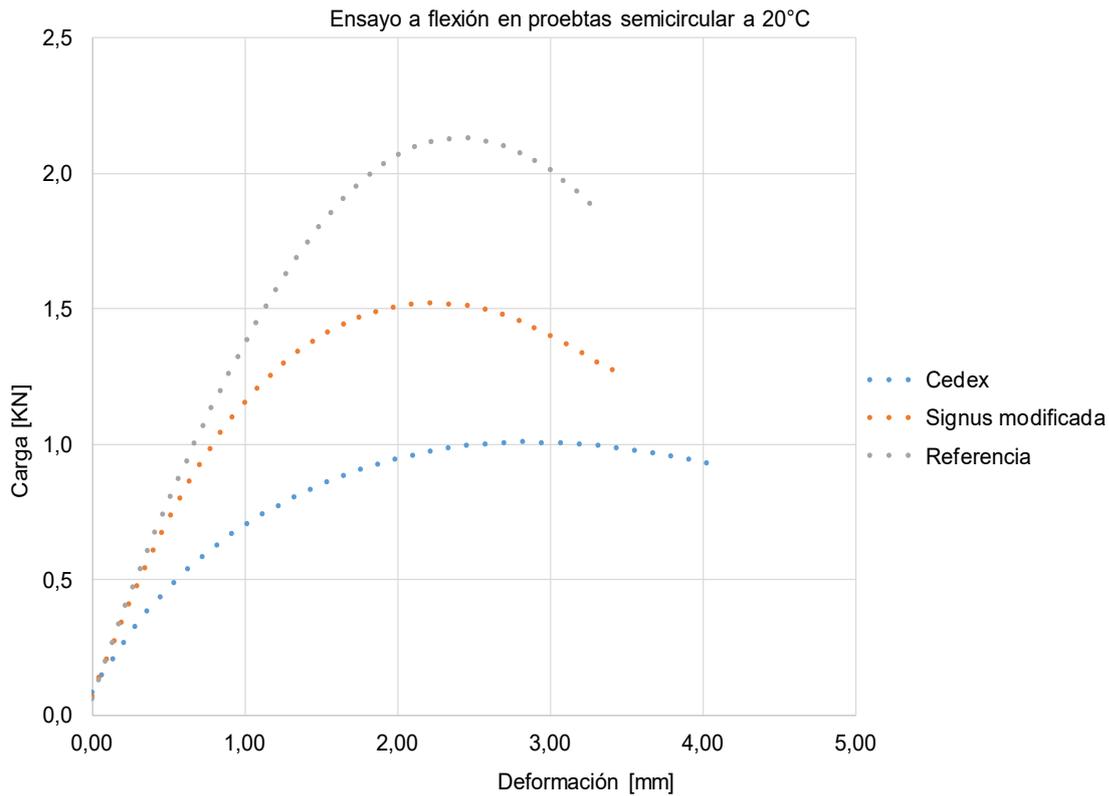


Figura 5.19. Curvas de regresión de resultados a propagación de la fisura mediante flexión, de cuatro probetas semicirculares. Temperatura de ensayo: 20 °C. (Fuente propia)

La mezcla de referencia y la CEDEX, tienen contenidos de vacíos elevados, del 9,75 % y 12,65 % respectivamente. Sin embargo, la mezcla SIGNUS modificada (SM) tiene un contenido de huecos del 4,00 %, es decir es más impermeable que las otras dos mezclas.

La indirect tensile stress ratio (ITSR) indica una relación con el contenido de huecos. A mayor contenido de huecos el efecto del ataque del agua es mayor.

En cuanto al módulo de rigidez, el valor en la mezcla referencia (3108 MPa) es el habitual en mezclas con este contenido de huecos, aproximadamente 3000 MPa. La mezcla CEDEX muestra un módulo de rigidez bajo, 1238 MPa, como resultado de su alto contenido de huecos y el elevado contenido de ligante BMAVC-1b. La mezcla SM tiene un módulo más alto, 2888 MPa, debido a que, aunque incorpora el mismo BMAVC-1b, tiene pocos huecos de aire, lo que en general se traduce en módulos de rigidez altos.

En cuanto a los ensayos de progresión de fisuras con probetas semicirculares, si se atiende al pico máximo de la curva de rotura, la mezcla de referencia sería la que ofrece mejor comportamiento, tanto a 5 °C como a 20 °C. Sin embargo, la

deformación (eje x) que corresponde al pico de la fuerza (eje y), o al 80 % del pico en la bajada, resulta descriptiva del comportamiento de capas de refuerzo sobre pavimentos fisurados o con juntas. Una deformación más alta indica una mayor capacidad de la mezcla para deformarse sin romperse. De acuerdo con esto, la mezcla más resistente a 5 °C es la mezcla SM, con una elongación hasta el 80 % de la fuerza máxima de 2,75 mm, le sigue la mezcla CEDEX y la referencia con valores 2,40 mm y de 1,90 mm respectivamente.

Analizando las curvas a 20 °C, la mezcla con mayor deformación de rotura es CEDEX con 4,10 mm, seguida de SM y referencia con 3,40 mm y 3,30 mm respectivamente.

Por otro lado, un parámetro para evaluar la resistencia a la fractura mediante la utilización del ensayo de flexión realizado a probetas semicirculares, es la tasa de energía liberada de deformación crítica. Este parámetro, es apropiado para caracterizar la resistencia de un material a la propagación de una fisura, donde para altos valores de dicha tasa, mayor es la resistencia a la fractura del material. La misma en su cálculo, considera la energía de deformación para el fallo del material, obtenida como el área de la curva carga deformación (Vidal, 2011). En este sentido, se puede observar que el área de la curva SIGNUS modificada a 5 °C es mayor a las otras dos y a 20 °C se encuentra en una situación intermedia.

## **5.2 Evaluación de la propagación de fisuras**

La valoración de la capacidad de disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras, se ha realizado en probetas ensayadas con la metodología del modelo de reflejo de fisuras con equipo de cargas cíclicas (MR) LEMaC, visto en el capítulo 3 en el apartado 3.4.2. Además, como determinación previa a dichas probetas del modelo, se ha realizado una medición similar en ejemplares rectangulares de 30 cm de largo, 10 cm de ancho y 5 cm de espesor, llamadas probetas de pruebas, como se puede ver, en la Figura 5.20. Las mismas fueron obtenidas cortando las del ensayo de ahuellamiento, elaboradas para cada tipo de mezcla estudiada. Esta valoración previa ha sido sólo a los efectos de una primera aproximación en la determinación del comportamiento estudiado.

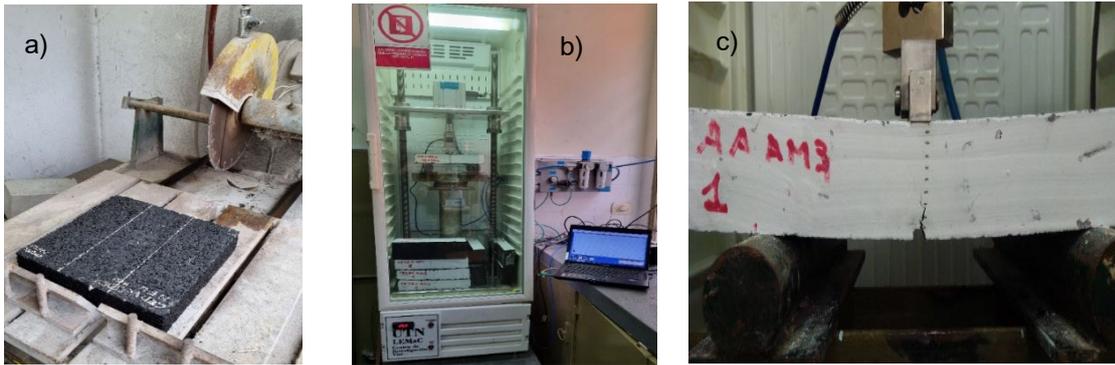


Figura 5.20. Ensayo a propagación de fisuras en probetas previas. a) Corte de probetas rectangulares. b) Equipo de ensayo. c) Ensayo en proceso. (Fuente propia)

### 5.2.1. Resultados en las mezclas: arenas asfalto, microaglomerado asfáltico en caliente y CEDEX

La valoración de la propagación de fisuras en las mezclas se ha llevado a cabo en las probetas del modelo en las tres diferentes AA, Figura 5.21, los dos MAC, Figura 5.22, y dos CEDEX. Las mismas fueron elaboradas con las granulometrías adoptadas en el apartado 5.1.1 y con los ligantes de la Tabla 5.2. En cuanto a la valoración del avance de la fisura, Martínez y otros (2008) mencionan que, en una modelización con similar sistema de solicitación y de una sola capa asfáltica colocada sobre otra con fisura preexistente, es posible realizar una medición de la longitud de la fisura refleja de manera indirecta, basado en un carácter de deformabilidad, asumiendo que el sistema se vuelve más deformable a medida que progresa la fisura. Para ello, utiliza un sensor de deformación del tipo LVDT, Linear Variable Differential Transformer, colocado en la parte inferior sobre la fisura preexistente. Además, considera que, al inicio del ensayo la carga aplicada produce una apertura de la fisura, mientras que cuando la misma ha alcanzado cierta longitud, esta se amplía. También, establece una función entre las distintas longitudes de la fisura y la relación entre la apertura de la misma en la situación inicial y a medida que esta progresa, por lo que con dicha función se estimó la longitud de la fisura a partir del aumento de la abertura en la parte inferior de la probeta. Además, es posible expresar una función entre la cantidad de ciclos necesarios para la reflexión total, es decir la rotura de la probeta, y la solicitación inicial aplicada expresada en términos de la apertura inicial. Esto permite visualizar, mediante su gráfica, cuál de las mezclas podría presentar mayor número de ciclos para alcanzar la reflexión total, frente a mayores aperturas iniciales. Los resultados obtenidos de ciclos de carga, para cada una de las mezclas estudiadas, tanto para

inicio de fisura, como para rotura de la probeta se muestran en la Tabla 5.14, realizando todas estas determinaciones de manera visual registrando presencialmente y con soporte de grabación. Para ello, se acudió para ayuda visual, al pintado de la cara de la probeta con pintura elaborada con agua y cal, ya que ésta permite apreciar fácilmente la aparición y progreso de las fisuras. Asimismo, este último fue registrado, a través de marcas de 5 mm realizadas en la cara pintada, a medida que la misma ascendía hasta la superficie, estando este procedimiento basado en los antecedentes de Delbono (2014). La metodología de medición de avance de la fisura de Martínez y otros (2008), siendo utilizada en un trabajo considerado como próximo a la investigación de esta tesis, no fue posible de implementarlo debido a que no se contaba con los recursos necesarios para ello, ya que no se disponía de LVDT de las características necesarias para esta medición, el software para registro de datos, entre otros, la cual ha sido considerado para futuras investigaciones. Los valores obtenidos visualmente han sido graficados, Figura 5.23, para poder comparar los distintos desempeños entre las mezclas. Además, dado que este trabajo ha considerado una relación comparativa de las distintas mezclas, y que es habitual expresar los resultados en términos de eficiencia de un sistema de retardo de fisura respecto a otro considerado como testigo (Martínez et al., 2008) (Delbono, 2014), se ha determinado dicha eficiencia en la Tabla 5.14. Esta última es cuantificada como la relación entre el número de ciclos requeridos para la reflexión total para uno de los sistemas, respecto al número de ciclos requeridos para la reflexión total para el testigo, en este caso la mezcla AA CA30. En caso de ser esta eficiencia próxima a 1, ambos sistemas son igualmente eficientes, si es mayor a 1, es más eficiente que el testigo y a la inversa si es menor que 1.

*Tabla 5.14. Resultados de ensayo a propagación de fisura en todas las mezclas estudiadas. (Fuente propia)*

Mezcla/Ensayo	Probetas del modelo		
	Inicio Fisura [ciclos]	Rotura [ciclos]	Eficiencia
AA CA30	70	800	1
AA AM3	60	810	1,01
AA NFU	160	908	1,14
MAC AM3	100	1768	2,21
MAC NFU	205	2224	2,78
CEDEX AM3	15	45	0,06
CEDEX NFU	40	150	0,19

En este sentido, se ha realizado la gráfica en la Figura 5.24 con los mismos datos de la Tabla 5.14, pero que así expresados es posible apreciar, no solo cuál de las mezclas ha resistido más cantidad de ciclos, sino la pendiente de la curva de cada una de ellas, que muestra la tasa de propagación. También, se observó que las fisuras no se propagaron a través de los agregados, tal como lo esperado, su ascenso fue por el mastic de la mezcla, Figura 5.25.

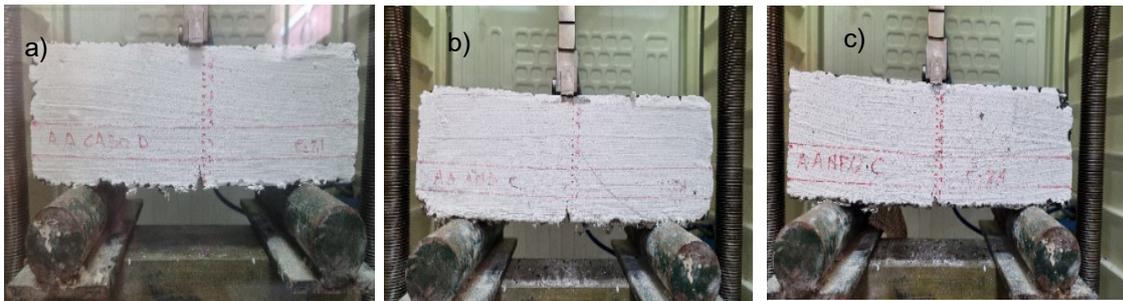


Figura 5.21. Ensayo probetas modelo con diferentes mezclas en capa central. a) AA CA30. b) AA AM3. c) AA NFU. (Fuente propia)



Figura 5.22. Ensayo probetas modelo con diferentes mezclas en capa central. a) MAC AM3. b) MAC NFU. (Fuente propia)

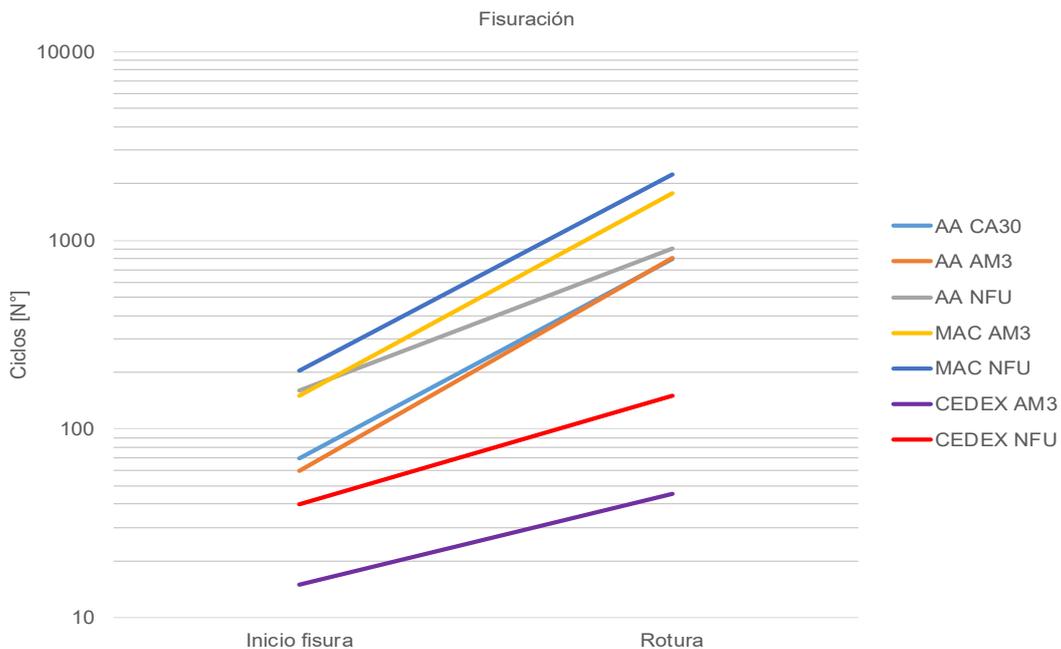


Figura 5.23. Resultados de ensayo de probetas modelo de las distintas mezclas. (Fuente propia)

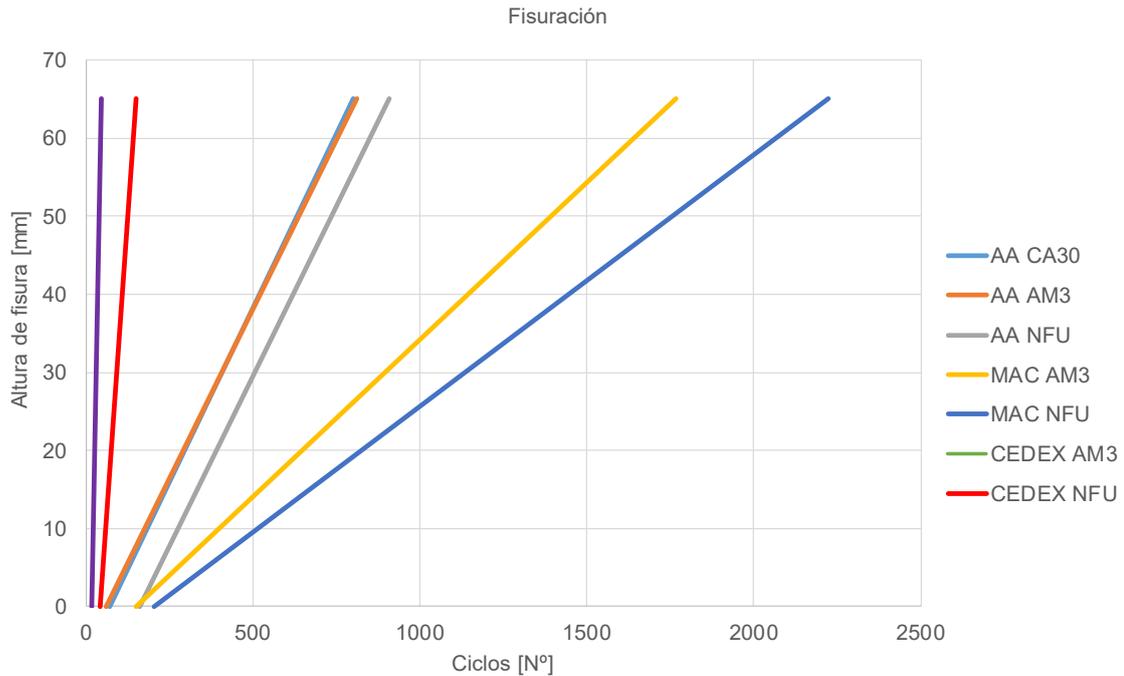


Figura 5.24. Resultados de ensayo de probetas modelo de las distintas mezclas, curvas de evolución de fisuras. (Fuente propia)



Figura 5.25. Vista probeta luego de rotura. a) Capa intermedia AA CA30. b) Capa intermedia MAC NFU. (Fuente propia)

En la Figura 5.23, se puede observar que todas las combinaciones elaboradas con CA30-A+24% exhiben una mayor cantidad de ciclos a la rotura en comparación con otras mezclas de la misma granulometría, Tabla 5.14, utilizando el modelo de sollicitación dinámica para la evaluación. Asimismo, en la Figura 5.24, las menores pendientes de las curvas muestran una mayor cantidad de ciclos para el avance de la fisura. Esto se considera que se deba a que este tipo de aglutinante, cuando se asocia con una estructura granular discontinua que incluye componentes gruesos y una cantidad adecuada de finos, como es el caso de MAC NFU, permite alcanzar un mayor número de ciclos antes de la rotura. También, este mejor desempeño, fue obtenido en las probetas de prueba, antes mencionadas, por el MAC NFU. Por otro lado, el MAC AM3 muestra una menor resistencia a los ciclos en comparación con el MAC NFU. Esta diferencia se atribuye a que el primero presenta una proporción más alta de vacíos, según se

indica en la Tabla 5.13, y en estos espacios hay menos mastic asfáltico, y junto a un asfalto con una capacidad elástica más baja, resulta en una menor capacidad para disipar la energía de la fisura. Las mezclas AA mostraron valores mayores de ciclos a la rotura que las CEDEX, pero otros parámetros como el ahuellamiento han sido uno de los mayores obtenidos, Figura 5.10. Las CEDEX son las que menor desempeño mostraron ante estas sollicitaciones.

### 5.2.2. Análisis entre ciclos a rotura y módulo de las mezclas

Los módulos de las mezclas presentados en la Tabla 5.12 y los ciclos necesarios para las roturas de las mismas, Tabla 5.14, se han relacionado en la gráfica de la Figura 5.26. En esta se observa que los ciclos tienden a aumentar a medida que se incrementa el módulo de la mezcla, con una moderada relación entre ambos, pero es posible visualizar dicha tendencia, en la curva de regresión en línea de puntos negra. La misma podría ser resultado de una mejor distribución de tensiones, cuando el módulo aumenta, éstas se distribuyen de manera más uniforme en una superficie mayor, lo que conduce a una menor concentración de tensiones en la fisura inducida.

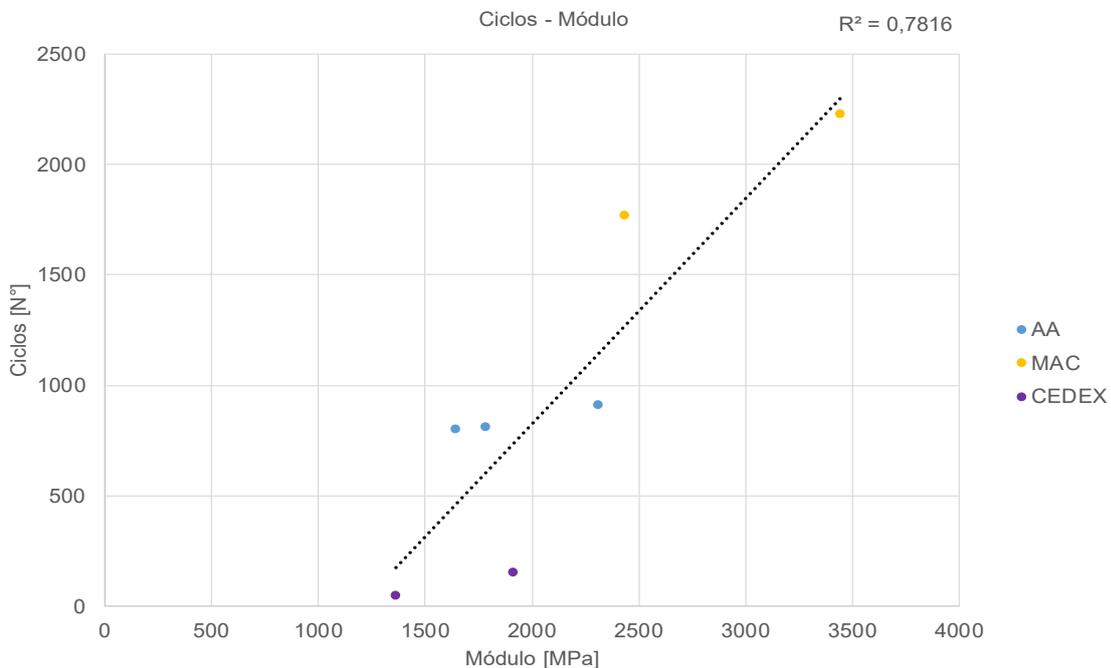


Figura 5.26. Relación entre ciclos a rotura y módulo. (Fuente propia)

### 5.2.3. Análisis entre ciclos a rotura y relaciones volumétricas

En cada una de las mezclas, se ha determinado los vacíos del agregado mineral (VAM) y la relación betún vacíos (RBV) y se las ha graficado, respecto de los ciclos

necesarios para las roturas de las mismas, Tabla 5.14, en la Figura 5.27. En esta se observa que la AA NFU y MAC NFU presentan las mayores relaciones RBV y similares VAM. En la primera necesariamente requieren mayor cantidad de ligante, por la presencia de finos, y en la segunda, el exceso de asfalto se asocia a la necesidad de contener la cantidad de polvo de NFU. No obstante, ante estas similares relaciones volumétricas se observa un mayor desempeño a ciclos de rotura en el MAC NFU. Esto se considera se deba al mecanismo de transferencia de carga del esqueleto granular y que los espacios ocupados parcialmente por el mastic, formado por los finos y el ligante modificado con NFU, generan un medio que dificulta el crecimiento de la fisura. Esto debido, a que ese medio está formado por una proporción de mastic respecto de los vacíos que, junto con las mejores características del ligante, permite a estas mezclas disipar mejor la energía y disminuir la velocidad de ascenso de las fisuras.

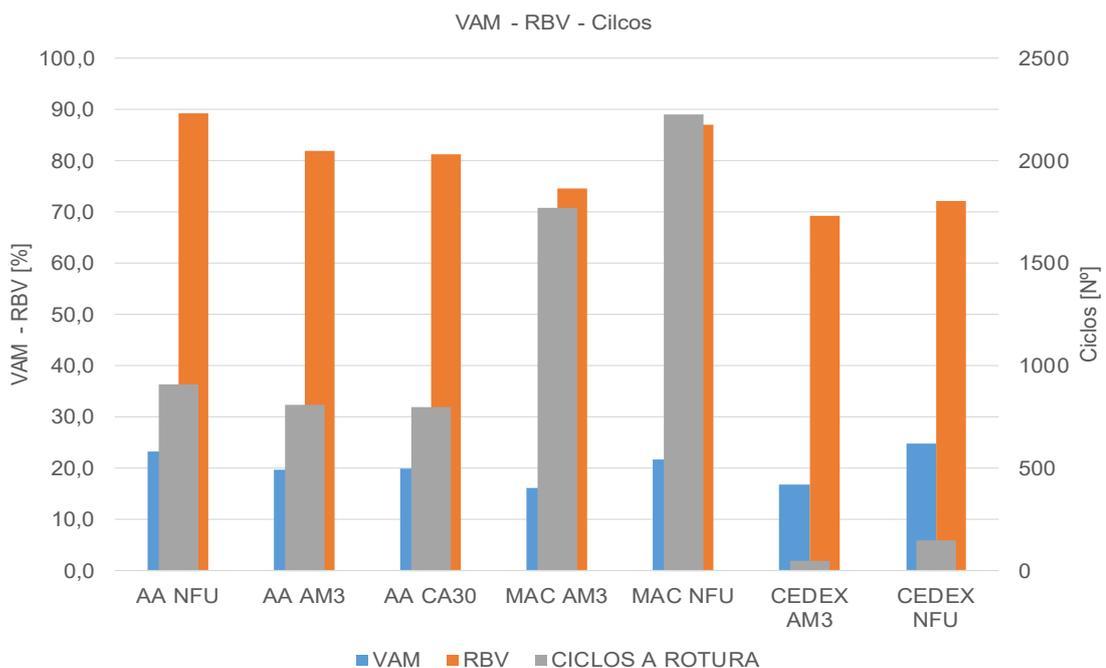


Figura 5.27. Relación entre ciclos a rotura y relaciones volumétricas. (Fuente propia)

#### 5.2.4. Análisis entre ciclos a rotura y las determinaciones reológicas en los ligantes: barrido de temperatura, barrido de amplitud, integridad del material vs intensidad del daño y ciclos hasta la falla vs deformación

El mejor desempeño, en cuanto a la cantidad de ciclos hasta alcanzar la rotura de las mezclas elaboradas con el asfalto CA30-A+24%, se estima que pueda deberse al aporte de éste, en función de su comportamiento reológico observado en el capítulo 4. En el barrido de temperatura realizado, Figura 4.17, se evidenció

una fuerte modificación del ligante al incorporar el NFU. Además, una mayor temperatura para el  $G^*/\sin \delta$  evidencia un mejor desempeño elástico. También, en el barrido de amplitud, Figura 4.19, ha mostrado que el CA30-A+24% requiere una deformación mayor hasta alcanzar un descenso en la curva de dicho barrido. En dicha figura, se puede ver que el área situada debajo de esta curva es superior a la de los otros dos ligantes. Esto sugiere que, al estar vinculado con la energía necesaria para alcanzar el punto de ruptura del material, indica que el mismo demanda una cantidad mayor de energía para llegar a dicha condición. Asimismo, en el análisis de integridad del material vs intensidad del daño, Figura 4.20, este ligante ha mostrado un mejor desempeño, similar al AM 3, de su integridad frente a aumento de la intensidad del daño. En adición a estos, se ha observado una mayor cantidad de ciclos de carga hasta la falla por deformación de corte, Figura 4.21, siendo esto un comportamiento relevante por su similitud a la sollicitación dinámica realizada en las probetas del modelo.

### 5.3 Referencias

AAPTP (2009). Airfield Asphalt Pavement Technology Program. Technical Guide AAPTP 05-04. Techniques for Mitigation of Reflective Cracks. pp 70.

AASHTO T 283 (2022). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos. pp 10.

Borreli, M. (2020). Jornada del asfalto. Asociación uruguaya de caminos. Rehabilitación en mezcla asfáltica- Ruta1doble vía Acceso a Montevideo. Uruguay. <https://bitafal.com.uy/arena-asfalto-con-am3-en-ruta-1/>

CEDEX (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Medio ambiente y de Fomento de España. Madrid, España. ISBN: 978-84-7790-450-2. pp 63.

Delbono, L. (2014). Estudio de grillas poliméricas en sistemas anti-reflejo de fisuras bajo solicitaciones dinámicas. Tesis doctoral en ingeniería mención materiales. Universidad tecnológica nacional. La Plata, Argentina. ISBN 978-987-1896-38-7. pp 414.

Martínez, F., Angelone, S. (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. ISBN 978-950-630-026-5.

PG-3 (2014). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Orden FOM/2523/2014.

Plan de pavimentación 1200 cuadras (2001). Pliego de especificaciones técnicas. Municipalidad de La Plata. Buenos Aires, Argentina.

Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo denso (2017). Dirección Nacional de Vialidad (DNV). Argentina.

Pliego de especificaciones técnicas generales para microaglomerados asfálticos en caliente y semicaliente tipo F (2017). Dirección Nacional de Vialidad (DNV). Argentina.

Segura, A., Gallego, J., Botasso, G., Raggiotti, B. (2022). Congreso: Rubberized Asphalt - Asphalt Rubber RAR2022. Evaluation Of Anti-Reflective Cracking Mixtures Made With High Nfu Asphalts. Málaga, España. Locape - Artes gráficas, Lda. Portugal. ISBN: 978-989-53684-0-2. pp 11.

Segura, A., Positieri, M., Botasso, G. (2018). Libro: Utilización de asfalto modificado con NFU. Elaboración de un microconcreto discontinuo en caliente. Volumen I. Publicia. London, United Kingdom. ISBN: 978-620-2-43179-8. pp 286.

SIGNUS (2017). Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumático. Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso. Madrid, España. ISBN 13 978-84-616-9263-7. pp 35.

Uguet, M., Larsen, D., Williams, E., Nosetti, A., Morano, P., Perazo, A. (2020). Arena asfalto como sistema antirreflejo de fisuras en la provincia de buenos aires. Congreso: XXXIX reunión del asfalto. Encuentro binacional argentino - paraguayo. Argentina. a0075. pp 15.

UNE EN 12697-26 (2006). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Rigidez. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 26.

UNE-EN 12697-12 (2006). Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezclas bituminosas. Determination of the wáter sensitivity of bituminous specimens. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 14.

UNE-EN 12697-22 (2008). Método de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Ensayo de rodadura. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking. Asociación española de normalización y certificación. España. pp 32.

UNE-EN 12697-5-6-8 (2007). Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima. pp 22. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático. pp 20. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas. pp 14. Part 5: Determination of the maximun density. Part 6: Determination of bulk density bituminous specimens. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. Asociación española de normalización y certificación. España.

Vidal, G. (2011). Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental. Ensayo fénix. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Programa de doctorado. Gestión del territorio e infraestructura del transporte. Barcelona, España. pp 196.



# Capítulo 06: Conclusiones

---

## RESUMEN

En este capítulo se presenta las consideraciones generales y conclusiones a las que se aborda, en los aspectos relacionados con los ligantes y mezclas asfálticas estudiados. Por último las líneas de investigaciones a futuro que se consideran oportunas.

### 6.1 Consideraciones generales

Durante el curso de la investigación, se ha llevado a cabo una revisión teórica exhaustiva, complementada con extensos experimentos de laboratorio sobre los materiales que componen los modelos analizados.

Se han efectuado diversas contribuciones en el ámbito académico, incluyendo publicaciones, participaciones en congresos nacionales e internacionales, así como seminarios y talleres de formación. Durante estas instancias, se compartieron los desafíos, progresos y soluciones logradas. Además, se estableció interacción con el sector público a través de la transferencia tecnológica, colaborando en la redacción de las primeras especificaciones técnicas en Argentina para mezclas asfálticas con la inclusión de polvo de NFU, destinadas a la provincia de Buenos Aires

Esta tesis fue la base de dos proyectos de investigación y desarrollo de la Universidad Tecnológica Nacional. El primero se titula "Análisis reológico de asfaltos convencionales y modificados para predecir su rendimiento en mezclas asfálticas" con el código ECIFNCO0005288, mientras que el segundo proyecto se denomina "Evaluación del rendimiento de mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados con una alta proporción de neumáticos fuera de uso (NFU)", con el código UTN ECIFNCO0008606. Ambos proyectos son llevados a cabo por los centros de investigación CINTEMAC UTN FRC, LEMAC UTN FRLP y la municipalidad de la ciudad de Córdoba.

Se exploraron herramientas para modelar las condiciones de carga y, considerando el deterioro y la rehabilitación de un pavimento flexible, se procuró retardar dichos deterioros, como las fisuras reflejas, mediante la aplicación de

diversas mezclas. Por tanto, se considera que los métodos seleccionados, de entre la variedad de pruebas disponibles, son adecuados para cumplir con los objetivos establecidos en la tesis. Además, los resultados experimentales respaldarían la utilización de mezclas para evitar la propagación de fisuras.

En base a las normativas más recientes y la bibliografía, se llega a la conclusión de que no hay consenso respecto a cuál de todos los equipos disponibles en el mercado internacional es el más representativo o conveniente. Los límites tolerables para una mezcla, en términos de prevención de fisuras, se basan en su comportamiento en relación con las condiciones del sistema de referencia adoptado. Por lo tanto, es esencial alcanzar un acuerdo en cuanto a las dimensiones de las muestras, los equipos utilizados, las condiciones de carga y la temperatura. Esto permitiría estandarizar las diversas pruebas a nivel global y facilitar la realización de trabajos interlaboratorios. Estos esfuerzos conjuntos ayudarían a establecer valores límite para la aceptación o el rechazo de los diferentes materiales.

## **6.2 Conclusiones**

### **6.2.1. Relacionadas con el objetivo general**

Mediante el desarrollo de esta tesis se ha podido, para un asfalto con alta incorporación de polvo de NFU, encontrar los materiales para su elaboración, sus proporciones y realizar su caracterización. También valorar la respuesta, de diferentes tipos de mezclas asfálticas, frente a sollicitaciones dinámicas en un modelo que permitió evaluar su desempeño como capa que retarde la fisuración refleja, en tareas de rehabilitación de pavimentos. Esta valoración de las distintas mezclas, que fueron elaboradas con el asfalto antes dicho y con otros, posibilitó la comparación entre ellas y también relacionarlo con el desempeño reológico del ligante logrado.

### **6.2.2. Relacionadas con los asfaltos con alta tasa de NFU**

En el desarrollo de esta tesis, se obtuvo polvo de NFU en el mercado local, que presenta un pasante del 86 % en el tamiz 0,71 mm (Nº 25), como se ha indicado en la Tabla 2.3. El manual del CEDEX sobre la incorporación de caucho de NFU en mezclas asfálticas, proporciona especificaciones que el polvo del mismo debe

cumplir. En dicha tabla, se detalla el cumplimiento granular de la muestra seleccionada para modificar el asfalto. En esta se puede ver que la misma encuadra dentro del entorno P1 de dicho manual, mostrado en la Tabla 2.2. También en la Tabla 2.4 se presentan las densidades obtenidas, y éstas satisfacen los valores requeridos para los procesos de diseño especificados por el mismo manual en la Tabla 2.2.

En Argentina, la norma IRAM 6673 de clasificación de asfaltos que incorporan polvo de caucho reciclado se ha recorrido en Capítulo 4. En este se han mencionado los asfaltos con inclusión de caucho molido (AC), los modificados con caucho (AMC) y los modificados de alta viscosidad con caucho (AMAVC). En el caso de los primeros (AC), siendo inicialmente los mencionados en la primera versión de esta norma, esta clasificación es comparable a los betunes mejorados con caucho denominados BC, de normativa internacional. Los segundos y terceros, han sido incorporados en una nueva versión de dicha norma, que actualmente está en discusión. Estos son parecidos a los PMBC y BMAVC respectivamente, a la especificación internacional mencionada. Por esto, nuestro país carece de una clasificación específica para los asfaltos modificados, al menos hasta que esta última versión haya sido aprobada, que incluyen una alta incorporación de polvo de NFU y que cumplan con los estándares de los asfaltos modificados tradicionales. Asimismo, no hay pautas sobre qué tipos de asfalto con polvo de NFU se deben usar en las mezclas asfálticas ni orientaciones sobre su idoneidad para diferentes tipos de capas. En este sentido los resultados obtenidos, de los asfaltos modificados con alta tasa de NFU con materiales locales y las mezclas realizadas con estos, realiza un aporte para disponer de valores de caracterización de los mismos.

Las dispersiones de polvo de NFU en el asfalto, se han llevado a cabo en un equipo que simula las condiciones industriales de dispersión, como se ha mostrado en la Figura 4.6. Se ha tomado especial cuidado para evitar la formación de vórtices y prevenir el flujo circulatorio no deseado durante el proceso, garantizando así el no envejecimiento del ligante asfáltico.

Los parámetros evaluados como la penetración, punto de ablandamiento y viscosímetro rotacional a diferentes temperaturas, en la Tabla 4.9, han permitido observar las modificaciones generadas en los diferentes ligantes al incrementar la

tasa de NFU incorporado. La misma al ser incrementada en el entorno del 2 % o 3 %, no ha mostrado cambios significativos en los resultados de los ensayos realizados. En dicha tabla, se desprende que hay una baja variación de los mismos cuando se modifica la tasa y entorno mencionado.

El análisis y valoración de las distintas combinaciones planteadas y realizadas, en las Figuras 4.15, 4.16 y 4.18, han permitido llegar a cuál de ellas logra alcanzar los requerimientos de la especificación de la bibliografía adoptada. La cantidad de NFU a incorporar se ha definido en 24 % en un asfalto base clasificado como CA-30, para la obtención de un ligante modificado de alta viscosidad. Esto ha surgido de la “tensión” entre lograr un valor de penetración entre 30 – 40 (0,1 mm), punto de ablandamiento mayor a 68 °C y viscosidad a 170 °C mayor a 2000 mPa.s, recomendado por la bibliografía al respecto. Estas mismas determinaciones junto a una mayor temperatura para el CA30-A+24% en el G\*/ sen δ, Tabla 4.12, evidencia una fuerte modificación en el asfalto base un mejor desempeño elástico.

La determinación en el reómetro de las curvas del ensayo de barrido de amplitud para los tres tipos de ligantes utilizado, ha mostrado al analizar la Figura 4.21, que el CA30-A+24% requiere una deformación mayor hasta alcanzar un descenso en dicha curva. Esto muestra que el área debajo de ella, es mayor a la de los otros dos ligantes, por lo que, siendo esto asociado a la energía necesaria para llegar a la rotura del material, significaría que el mismo requiere de una mayor cantidad de ésta para llegar a tal situación. Es decir, que el asfalto CA30-A+24% necesitaría mayor cantidad de energía para alcanzar su rotura. También, en el análisis de integridad del material vs intensidad del daño, Figura 4.22, este ligante ha mostrado un mejor desempeño que el base y similar al AM 3. Estos dos últimos comportamientos son los que se consideran que intervienen en el mejor desempeño de las mezclas elaboradas con el CA30-A+24%, frente a las sollicitaciones dinámicas evaluadas en el modelo de retardo de fisuras.

En cuanto a estudios recientes, en países como China, en los ligantes asfálticos con alta incorporación de polvo de NFU, se puede mencionar que se han realizado sus caracterizaciones y determinaciones reológicas. Las mismas presentan algunas diferencias en cuanto al tamaño del polvo de NFU y algunos aspectos en el proceso de incorporación por vía húmeda que se utilizó en esta tesis. Esta última, es la que normalmente se ha empleado en investigaciones en Argentina y

España entre otros países. Asimismo, se encuentran similitudes en los resultados obtenidos en cuanto a una disminución de la penetración, aumento del punto de ablandamiento, aumento del módulo complejo de corte ( $G^*$ ) y disminución del ángulo de fase ( $\delta$ ), respecto al ligante original base. El aporte realizado en esta tesis se basa, para los diferentes ligantes utilizados y la comparación entre ellos, en la determinación reológica de barrido de temperatura, barrido de amplitud, determinación de la integridad del material respecto a la intensidad del daño y el cálculo de la cantidad de ciclos de falla a distintas deformaciones.

### **6.2.3. Relacionadas con las mezclas evaluadas para retardo de fisuras reflejas**

La aparición de fisuras es un problema muy común en las estructuras, pero determinar cómo se propagan, resulta complicado debido a la influencia de varios factores en su desarrollo. Entre estos, se encuentran las cargas del tránsito, las condiciones climáticas, los materiales utilizados en la construcción y el estado de deterioro del pavimento. Las condiciones de sollicitación sobre un pavimento fueron analizadas utilizando el equipo de cargas cíclicas (MR), como se mostró en la Figura 3.29. Este equipo fue el más adecuado para visualizar y evaluar el fenómeno de inicio y progreso de las fisuras, según tecnología disponible y la experiencia de autores locales, que trabajaron con dicho equipo y diferentes sistemas de apoyos. Es decir, el sistema adoptado con la configuración de apoyos y ausencia de soporte en la parte inferior de las capas asfálticas, ha permitido fácilmente medir y observar rápido el avance de las fisuras, considerando la situación buscada de realizar una comparación relativa entre las mezclas propuestas a evaluar. Por otro lado, si se materializa un sistema de apoyo que contemple el sustento que proporcionarían las capas inferiores de una estructura de pavimento en el sistema de sollicitación adoptado, la evolución del deterioro de la capa de retardo de fisura demandaría mayor tiempo de ensayo.

El porcentaje de ligante en las dosificaciones, no se ha mantenido constante para la misma estructura de agregados, como se presenta en la Tabla 5.11, al utilizar el modificado con NFU. Esto se estima sea debido a que se requiere una mayor cantidad de éste, por la elevada presencia de NFU, para lograr un adecuado recubrimiento de los agregados.

La elaboración de los tres tipos de mezclas con asfalto con NFU, a partir de las

tres granulometrías estudiadas en las Figura 5.2, 5.3 y 5.4, muestran que en todas se produce una disminución de sus densidades, Tabla 5.11. Esto se estima sea la respuesta que produce el efecto rebote del equipo de compactación por la presencia del NFU.

Una mayor temperatura del  $G^*/\text{sen}\delta$  para el CA30-A+24%, Tabla 4.12, evidencia un mejor desempeño elástico y que asociado a la granulometría del MAC NFU, da como resultado un menor ahuellamiento, Tabla 5.12.

El mayor valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  en CA30-A+24% no se ve reflejado en un menor ahuellamiento en la AA NFU, Tabla 5.12. Esto se considera se deba a que, por su granulometría continua y agregado fino, no es capaz de alojar la cantidad de NFU, generando una disipación de energía en la compactación trasladándose a una menor densidad, mayor ahuellamiento y un menor TSR frente a las otras mezclas.

En la mezcla “CEDEX NFU”, se observa un ahuellamiento levemente mayor que con AM 3, Tabla 5.12. Esto puede deberse a que su granulometría proporciona mayor cantidad de vacíos, Tabla 5.2, posee menor cantidad de finos que colabore con el mastic, generando una estructura con una menor capacidad de resistencia al ahuellamiento que en el MAC NFU.

Las mezclas elaboradas con CA30-A+24% presentan mayor cantidad de ciclos para la rotura respecto a las otras, Tabla 5.14 y Figura 5.23, en el modelo de sollicitación dinámica que se utilizó para la evaluación. Esto puede estar asociado a que, en el ascenso de la fisura, esta encuentra un material que presenta mayor resistencia a su paso, requiere mayor energía para su rotura, Figura 4.21, como se mencionó anteriormente. También, dicho mejor desempeño, se ha relacionado a lo observado a la cantidad de ciclos de carga hasta la falla determinados para diferentes deformaciones, Figura 4.23, en el que se determinó que el CA30-A+24%, admite una mayor cantidad.

En los ensayos de carga cíclica, se ha observado de manera rápida el inicio y la propagación de las fisuras. Las mismas se elevan verticalmente, siguiendo las caras de los agregados gruesos que encuentra en su trayectoria, Figura 5.25. Esto sugiere que la estructura granular juega un papel importante en los resultados obtenidos.

El CA30-A+24% asociado a una estructura granular discontinua, con presencia

de gruesos y una adecuada cantidad de finos, como es el caso de MAC NFU, ha admitido la mayor cantidad de ciclos hasta la rotura, Tabla 5.4. Esto se estima se deba a que la fisura encuentra a su paso un mastic asfáltico más elástico que ocupa los vacíos de ésta mezcla, disipando la energía y disminuyendo su rapidez de ascenso.

El MAC AM3 presenta menor cantidad de ciclos respecto del MAC NFU. Esto se estima a que el primero, presenta una mayor proporción de vacíos, Tabla 5.14 y en ellos hay una menor cantidad de mastic asfáltico, con un asfalto con menor capacidad elástica y por esto menor capacidad de disipar la energía de la fisura.

Entre las mezclas AA, MAC y CEDEX elaboradas con CA30-A+24%, se observa un incremento de vacíos, Tabla 5.2, una creciente discontinuidad granulométrica, Figuras 5.2, 5.3 y 5.4. Asimismo, el MAC NFU es la que más ciclos admitió hasta llegar a la rotura. Se estima que un aumento de la cantidad de vacíos que contengan un mastic asfáltico más elástico colabora a resistir más ciclos de carga. Esto último se considera que sucede hasta cierto incremento de vacíos, ya que en CEDEX la cantidad de ciclos es menor, Figura 5.23.

El aumento en el número de ciclos con el incremento del módulo, Figura 5.26, podría ser resultado de una mejor distribución de tensiones. Cuando el módulo aumenta, las tensiones se distribuyen de manera más uniforme en una superficie mayor, lo que conduce a una menor concentración de tensiones en la fisura inducida. Esta situación, podría aportar a que la mezcla soporte más ciclos antes de que se produzca la rotura.

En cuanto a los ensayos de progresión de fisuras con probetas semirculares, realizado en la experimentación en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid, en la Figura 5.18, la deformación al 80 % del pico de la fuerza en la bajada de la curva, que resulta descriptiva del comportamiento de capas de refuerzo sobre pavimentos fisurados o con juntas, muestra que una deformación más alta proporciona una mayor capacidad de la mezcla para deformarse sin romperse. De acuerdo con esto, la mezcla más resistente a 5 °C es la mezcla signus modificada. Siendo esta designación la utilizada para aquella experimentación, y su granulometría presenta escasa diferencia con el MAC, tal como se ha mostrado en la Figura 5.3. Con respecto a los ligantes utilizados para elaborar ambas hay una pequeña diferencia entre ellos, Tabla 4.9 y 4.10, pero se considera no significativa

a los efectos comparativos de la progresión de fisuras. Dicha determinación a 5 °C, podría interesar para predecir comportamientos a fisuración frágil de los refuerzos.

La mezcla MAC, elaborada con asfalto con alta tasa de NFU, ha sido innovadora en esta aplicación para retardo de fisuras, por su desempeño frente a la propagación de las mismas y su capacidad de alojar una elevada tasa de NFU. Es por ello, que haber evaluado las tres diferentes granulometrías, partiendo de la necesidad de mejorar los resultados en las AA, ha permitido incursionar en dicha aplicación ya que el MAC ha sido concebido principalmente como capa de aporte de características superficiales. Por esto, se puede mencionar que el MAC NFU se presentaría como una mejor alternativa para sistemas de retardo de fisura frente a las tradicionales mezclas AA usadas. Siendo esto un comportamiento a continuar evaluando mediante otros ensayos y modelos que permita evidenciar dicho desempeño.

En cuanto a estudios recientes, en países como China, en mezclas asfálticas elaboradas con ligantes con alta incorporación de polvo de NFU, se han determinado sus respuestas frente a la capacidad de resistir la propagación de fisuras. También, han analizado el desempeño mediante diferentes ensayos de distintas mezclas variando sus granulometrías, en probetas o elementos propios de dichos ensayos, obteniendo resultados con baja correlación entre ellos. El aporte de esta tesis se basa en la determinación de la respuesta de las mezclas estudiadas a través de un modelo que contempla en la probeta de ensayo, tres capas. En éstas, la intermedia es la que se ha buscado valorar su desempeño a resistir la propagación de fisura. Además, esta valoración ha sido correlacionada con las determinaciones reológicas aportadas en esta tesis de los ligantes utilizados.

Por todo lo anterior y con lo producido en esta investigación, se ha podido colaborar como integrante y autor del capítulo de Mezclas Asfálticas para Retardo de Fisuras (MARF), del primer pliego de especificaciones técnicas que consideran la utilización de polvo de NFU en Argentina, Anexo I, en el ámbito de la Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, en el marco del programa del fondo de innovación tecnológica de la Provincia de Buenos Aires.

### **6.3 Perspectivas de investigación a futuro**

Evaluar el desempeño de estas mezclas en los mismos modelos, cuando las uniones de interfase se utiliza el mismo ligante que para la elaboración de la mezcla, el CA30-A+24%, en lugar de emulsiones. Además, realizar la misma valoración en sistemas en los que la capa de refuerzo se realice con mezclas elaboradas con el asfalto altamente modificado con polvo de NFU.

Determinar y analizar los estados tensionales en las mezclas asfálticas evaluadas en la zona de la fisura existente y la determinación indirecta de la propagación de la misma, mediante modelos numéricos o por análisis con elementos finitos.

Medir las deformaciones en la apertura de fisura con las sucesivas aplicaciones de carga y elaborar relaciones de éstas con determinaciones indirectas del crecimiento de la fisura.

Evaluar el comportamiento de mezclas en frío, como capas para retardo de fisuras, que sean conformadas con estructuras granulares que permitan alojar triturado de neumático de tamaño mayores a los utilizados en la presente investigación. Para ello se estima que el ligante a utilizar, podría ser una emulsión fuertemente modificada con polvo de NFU y como alternativa de comparación resinas.



# Anexo I:

## Producción científica

---

La tesis comenzó en el año 2019 partiendo del estudio de los asfaltos altamente modificados con polvo de NFU, luego con el estudio de alternativas de las distintas granulometrías para las diferentes mezclas evaluadas. Posteriormente la valoración del desempeño de dichas mezclas en la propagación de las fisuras, en el modelo de sollicitación de cargas cíclicas dinámicas. En el período comprendido desde el inicio hasta la presentación de esta documentación, se transitó la pandemia de COVID 19 y sus consecuencias debido al cierre de universidades, laboratorios y espacios de trabajo, no obstante, durante esta investigación se han realizado los aportes que se detallan en los siguientes apartados.

### **PUBLICACIONES**

1. Segura, A. (2023). Capitulo Libro: Asfaltos modificados con NFU. Unidad N°2 del libro "Tecnología de los materiales viales". pp.: 10. Libro, pp.: 119. ISBN: 978-987-8992-35-8
2. Revista: Obras y Proyectos. Chile  
Título: Valoración inicial de mezclas asfálticas retardantes de fisuras reflejas elaboradas con asfaltos con alta incorporación de NFU.  
Autores: Adrián Segura, G. Botasso, B. Raggiotti, I. Zapata, O. Rebollo.  
ISSN: 0718-2813. 11pp. Publicado diciembre 2023.
3. Título: III Jornadas latinoamericana de reciclaje de neumáticos. Sociedad latinoamericana del caucho SLTC.  
Trabajo: Utilización en altas tasas de polvo de NFU en la elaboración de mezclas asfálticas utilizadas en capas para retardo de fisuras.  
Autores: A. Segura, G. Botasso, B. Raggiotti. O. Rebollo, I. Zapata, F. Vázquez. Lima, Perú. Septiembre 2023.
4. Título: 8vo. Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. JIM 2023. Asociación Argentina de Materiales. Trabajo: Desempeño de mezclas asfálticas retardante de las fisuras reflejas elaboradas con alto contenido de polvo de NFU.

5. Periódico: El Constructor. Edición día del camino.  
Título: "Agrietamiento del material, piel de cocodrilo y resistencia a la tracción". Autores: I. Zapata, A. Segura, G. Botasso. ISSN: 0329-3726. 2pp. Edición N° 5154. Publicado octubre 2020.  
Autores: A. Segura, G. Botasso, B. Raggiotti. O. Rebollo, F. Vázquez. Córdoba, Argentina. Septiembre 2023. ISBN: 978-950-42-0230-1
6. Título: Congreso idetec, Investigaciones y Desarrollos en Tecnología y Ciencia.  
Trabajo: IPR10-007: Reología de asfalto fuertemente modificado con neumático fuera de uso NFU.  
Autores: A. Segura, I. Zapata, F. Vázquez, A. Mamondi, M. Picolet, G. Illarra. Villa María Córdoba. Noviembre 2022. ISBN: 978-987-8992-02-0
7. Título: CILA. Congreso iberolatinoamericano del asfalto. Uruguay 2022.  
Trabajo: Alternativas de mezclas asfálticas antirreflejo de fisuras con asfaltos con alta tasa de NFU.  
Autores: A. Segura, G. Botasso, B. Raggiotti. O. Rebollo, I. Zapata. Punta del este Uruguay. Noviembre 2022
8. Título: Rubberized Asphalt - Asphalt Rubber RAR2022.  
Trabajo: Evaluation Of Anti-Reflective Cracking Mixtures Made With High Nfu Asphalts.  
Autores: A. Segura. J. Gallego. G. Botasso, B. Raggiotti. Málaga, España. Junio 2022. ISBN: 978-989-53684-0-2
9. Título: XXXIX Reunión del asfalto. Encuentro binacional Argentino-Paraguayo del asfalto.  
Trabajo: Obtención de asfalto altamente modificado con polvo de NFU.  
Autores: A. Segura, G. Botasso, B. Raggiotti, O. Rebollo, I. Zapata. Córdoba Argentina. Noviembre 2020.
10. Título: Segundo Workshop Internacional Lat-RILEM sobre Materiales y Estructuras.  
Organizado: Universidad tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Grupo Latinoamericano RILEM.  
Trabajo: "Obras con capas asfálticas antirreflejo de fisuras en la provincia

de Buenos Aires - Innovaciones tecnológicas y normativas y normativas. En mesa 3: Materiales asfálticos”.

Autor: A. Segura

Noviembre 2020. Córdoba Argentina.

11. Título: 15 Congreso Internacional de Patología y Recuperación de Estructuras. CINPAR 2019

Trabajo: Resumen Asfalto altamente modificado con NFU

Autores: A. Segura, G. Botasso, B. Raggiotti, O. Rebollo. ISBN 978-950-623-197-2. Octubre 2019. Salta Argentina.

12. Título: X EnIDi – 2019. Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería.

Trabajo: “Avances: Asfaltos altamente modificados con polvo de NFU en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja”

Autores: A. Segura, G. Botasso, O. Rebollo, F. Vázquez, L. Sanchez, B. Raggiott

ISBN 978-950-42-0197-7. Octubre 2019. Los Reyunos, San Rafael. Mendoza Argentina.

## **PRODUCCIONES Y BECAS**

1. Título: “Valoración de desempeño de mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados con alta tasa de neumáticos fuera de uso NFU”.

Director: Mg. Ing. Adrián Segura.

Código: ECIFNCO0008606

Integrantes: CINTEMAC-LEMAC.

Duración: 01/04/23-31/03/26

Participación: Director.

2. Título: Beca Movilidad profesorado argentino 2020. Ministerio de educación de la nación argentina y la Fundación Carolina de España.

Tarea: Estancia doctoral para desarrollo en la Universidad Politécnica de Madrid del proyecto de investigación “Caracterización reológica de asfalto caucho de alta viscosidad y su valoración en el desempeño en mezclas asfálticas”.

Septiembre – diciembre 2021. Madrid. España.

3. Título: “Elaboración de asfaltos de alta viscosidad a partir de incorporar polvo de neumático fuera de uso y su respuesta reológica”.  
Director: Mg. Ing. Adrián Segura.  
Código: Res. N77 GRFT2019. Ministerio de ciencia y Tecnología. Prov. de Córdoba.  
Integrantes: CINTEMAC - Dir. Obras Viales. Municipalidad de Córdoba.  
Duración: 01/11/2019 – 30/04/2021  
Participación: Director.
4. Título: “Análisis reológico de asfaltos convencionales y modificados a efectos de predecir su desempeño en mezclas asfálticas”.  
Director: Mg. Ing. Adrián Segura.  
Código: ECIFNCO0005288. SCTyP N° 153/18  
Integrantes: CINTEMAC-LEMAC- Dir. Obras Viales. Municipalidad de Córdoba. Duración: 01/01/2019 – 31/12/2022  
Participación: Director.
5. Creación del laboratorio de materiales asfálticos en la UTN FRC, en el Departamento de Ingeniería Civil.  
Año de inicio de actividades: 2013 en adelante.

#### **CAPACITACIÓN DICTADA Y TRANSFERENCIA**

1. Título: Jornada de reciclaje de neumáticos.  
Organizado: Sociedad latinoamericana del caucho. SLTC.  
Participación: Conferenciante.  
Septiembre 2023. Lima. Perú.
2. Título: JorDiCA 2021. 1º Jornada de divulgación colegio mayor argentino 2021. Organizado: Becarios Fundación Carolina y Ministerio de Educación Argentina. Participación: Expositor.  
Noviembre 2021. Madrid España.
3. Título: XXXIX Reunión del asfalto. Encuentro binacional Argentino-Paraguay del asfalto.  
Organizado: Comisión permanente del asfalto. Asociación paraguaya de carreteras.

Participación: Expositor. Asistente.

Noviembre 2020. Córdoba Argentina.

4. Título: Segundo Workshop Internacional Lat-RILEM sobre Materiales y Estructuras. Organizado: Universidad tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Grupo Latinoamericano RILEM.

Trabajo: "Obras con capas asfálticas antirreflejo de fisuras en la provincia de Buenos Aires - Innovaciones tecnológicas y normativas y normativas. En mesa 3: Materiales asfálticos".

Participación: Expositor.

Noviembre 2020. Córdoba Argentina.

5. Título: Jornadas de difusión de ciencia y tecnología CINTEMAC 2020 Organizado: Centro de investigación, desarrollo y transferencia de materiales y calidad CINTEMAC.

Participación: Expositor.

Junio 2020. Córdoba Argentina.

6. Título: Jornada de intercambio y difusión de los resultados de investigaciones de doctorandos en ingeniería de la Facultad Regional Córdoba. Declarada de interés académico por UTN FRC s/ Res. 1045/19. Trabajo: "Etapa inicial: Asfaltos altamente modificados con polvo de NFU en mezclas retardantes de la fisuración refleja".

Participación: Expositor.

Noviembre 2019. Córdoba Argentina.

7. Título: X EnIDi – 2019. Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería. Trabajo: "Avances: Asfaltos altamente modificados con polvo de NFU en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja".

Participación: Expositor.

Octubre 2019. Los Reyunos, San Rafael. Mendoza Argentina.

8. Título: X EnIDi – 2019. Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería. Trabajo: "Sesión de posgrado".

Autores: A. Segura.

Octubre 2019. Los Reyunos, San Rafael. Mendoza Argentina.

9. Título: Uso de reciclado de neumáticos fuera de uso, NFU, en pavimentos sustentables de la infraestructura vial del territorio de la provincia de buenos aires. Transferencia: fondo de innovación tecnológica de la Provincia de Buenos Aires FITBA.  
Finalidad: redacción de las primeras especificaciones técnicas de Argentina de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de NFU para pavimentos sustentables.  
Participación: integrante de proyecto. Autor y redacción de la especificación sobre Mezclas Asfálticas para Retardo de Fisuras (MARF).  
Destinatario de la producción: Dirección provincial de vialidad. Provincia de Buenos Aires.  
Año: 2023
10. Título: Asfaltos modificados con NFU. Destinatario: UTN FRLP. Horas: 4. Septiembre 2021.
11. Título: Tecnología de los materiales viales. Uso de caucho reciclado de neumático en mezclas asfálticas. Conceptos. Ensayos y normas. Destinatario: UTN FRLP. Horas: 4. Octubre 2020.
12. Profesor Cátedra “Vialidad urbana” de la Maestría en Ingeniería Vial. UTN FRLP. Res.: 1856/2022. Año: 2022 y continúa.

## **FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS**

1. Director de tesis de maestría en ingeniería vial. UTN FRLP  
Título: Mezclas asfálticas discontinua modificada con polvo de NFU predigerido, retardante de la fisuración refleja.  
Integrante: María Carolina Buscaglia  
Inicio de tesis: 2024
2. Codirector de tesis de maestría en ingeniería vial. UTN FRLP  
Título: Evaluación del desempeño de materiales de demarcación horizontal mediante ensayo de rueda cargada.  
Integrante: Roberto Guillermo Gómez  
Inicio de tesis: 2024

3. Tutor de tesis de grado.  
Título: Valoración de la capacidad en mezclas asfálticas conductoras con la utilización de NFU.  
Integrante: Brenda Martínez.  
Año: 2023.
4. Colaboración de tesis de grado.  
Título: Proyecto de pavimentación y construcción del refugio Cerro Chapelco, San Martín de los Andes, Neuquén.  
Integrantes: Conejo Gabriela, Conejo Valeria, Rossi Diego, García Pérez Joaquín. Año: 2020.
5. Tutor de tesis de grado.  
Título: Análisis de parámetros de diseño de la RN N°36 en el tramo Berrotarán – Coronel Baigorria y su influencia en la seguridad vial.  
Integrantes: T. Rodríguez, B. Schutz, C. Trillini.  
Año: 2020.
6. Tutor de tesis de grado.  
Título: Análisis de comportamiento estructural de refuerzos de pavimentos flexibles, con mezclas asfálticas convencionales y especiales, en rutas de la Provincia de Córdoba.  
Integrantes: Franco Vázquez, Sofía Ledezma.  
Año: 2019
7. Colaboración tesis de grado.  
Título: Proyecto de Ampliación y Refuncionalización de la Ruta Nacional N° 38". Integrantes: González Ferrero Jeremías, Navarro Augusto, Rufeil Ignacio.  
Año: 2019
8. Colaboración de tesis de grado.  
Título: Mejora del diseño geométrico y cálculo de paquete estructural RP23.  
Integrantes: Garrido Ricardo, Ergo Frenando.  
Año: 2019
9. Capacitación en mezclas asfálticas especiales, microaglomerado asfáltico en caliente elaborado con asfalto modificado. El mismo se colocó en

- viaducto de gran longitud a los efectos de mejorar la seguridad vial con pavimento mojado. Esta se realizó mediante visita técnica con alumnos y becarios a Obra de Cierre del Anillo de Circunvalación de la Ciudad de Córdoba. Tramo comprendido entre el nudo Tropezón y Avenida Spilimbergo (Nudo N°14: Mujer Urbana). Año: 2019
10. Capacitación en construcción de caminos de montaña en nueva traza y puentes de grandes luces. En la misma se mostró la construcción de un camino nuevo de montaña con voladura, movimiento piedra, trituración de éstas como canteras de aporte a la construcción de la obra. Asimismo, la tecnología de colocación de vigas lanzadas para puentes de grandes luces en montaña y tecnología de las mezclas asfálticas utilizadas. Dicha capacitación se realizó mediante visita técnica con alumnos y becarios a Obra Ruta Prov. F. Carmen - Altas Cumbres. Año: 2019
  11. Dirección de Beca de Iniciación en Investigación y Desarrollo (BINID). Res.: 458/23.  
Becario: Ing. Franco Vázquez.  
Proyecto: Valoración de desempeño de mezclas asfálticas elaboradas con asfaltos modificados con alta tasa de neumáticos fuera de uso NFU.  
Código: ECIFNCO0008606.  
Año: 2023
  12. Dirección de Beca de Iniciación en Investigación y Desarrollo (BINID). Res.: 424/22.  
Becario: Ing. Tomás Rodríguez.  
Proyecto: Análisis reológico de asfaltos convencionales y modificados a efectos de predecir su desempeño en mezclas asfálticas.  
Código: ECIFNCO0005288.  
Año: 2022

#### **CURSOS DE FORMACIÓN ACREDITADOS EN EL DOCTORADO**

1. Curso: Análisis y evaluación de proyectos viales con HDM 4. Resolución: C.S. N° 242/14. UNR.  
Profesor: Dra. Marta Pagola – Dr. Oscar Giovanon.  
Duración: 60 horas.

Lugar y fecha: Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, ingeniería y Agrimensura. Escuela de posgrado y educación continua. Septiembre 2023.

2. Curso: Estudio de la factibilidad, generación, producción y valoración de la calidad de los áridos provenientes de yacimientos de la provincia de Buenos Aires aplicados a obras viales. Resolución: C.S. UTN N.º 1708/2019. Profesor: Dra. María Correa - Lic. Nelson Corlale – Dra. Florencia Lajoine – Lic. Mario Tessone – Ing. Horacio Espinosa – Ing. Mariana Cides. Dr. Hugo Bianchetto - Ing. Demián Palumbo - Dr. Gerardo Botasso.

Duración: 70 horas.

Lugar y fecha: Universidad Tecnológica Nacional. FRLP. Agosto 2021.

3. Curso: Caracterización avanzada de materiales viales. Resolución: C.S. N° 735/19. UNR.

Profesor: Dr. Fernando Martinez – Dra. Silvia Angelone.

Duración: 60 horas.

Lugar y fecha: Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, ingeniería y Agrimensura. Escuela de posgrado y educación continua. Agosto 2020.

4. Curso: Fundamentos de reología y sus aplicaciones en sistemas diversos. Resolución: C.S. UTN N.º 1708/2019.

Profesor: Dr. Frédéric Irou Roschztardt - Dra. Lucia Garaventa – Dr. Gerardo Botasso.

Duración: 50 horas.

Lugar y fecha: Universidad Tecnológica Nacional. FRLP. Junio 2020.

5. Curso: Diseño estructural de pavimentos. Resolución C.S. N° 382/15. UNR. Profesores: Dr. Oscar Giovanon – Dra. Marta Pagol.

Duración: 60 hs.

Lugar y fecha: Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Escuela de posgrado y educación continua. Mayo 2019.

6. Curso: Tecnologías especiales en construcciones viales. Resolución C.S. N° 569/12. UNR.

Profesores: Dr. Fernando Martínez – Ing. Hugo Poncio – Ing. Jorge Páramo.

Duración: 50 hs.

Lugar y fecha: Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, ingeniería y Agrimensura. Escuela de posgrado y educación continua. Septiembre 2018.

# Asfaltos altamente modificados con polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) en mezclas asfálticas retardantes de la fisuración refleja

Adrián Noel Segura

*Los neumáticos fuera de uso (NFU) cuando han alcanzado su vida útil, pueden ser aprovechados de varias maneras. En la búsqueda de obtener ligantes con altas prestaciones elásticas, en la presente investigación se ha estudiado una alta incorporación de NFU en ellos.*

*Para esto, se realizó la incorporación de cantidades crecientes del polvo de NFU, en distintos tipos de asfaltos base. La caracterización y evaluación de sus comportamientos reológicos, permitió observar el grado de modificación, obtener un asfalto modificado con alta tasa de polvo de NFU y adoptar aquel que presentó las mejores características para la elaboración de mezclas retardantes de la fisuración refleja.*

*Este último deterioro difícil de controlar en pavimentos, consiste en la propagación de fisuras desde capas inferiores hacia la nueva capa colocada como refuerzo. Las mezclas más utilizadas para dicho retraso, han sido las arenas asfalto que en muchas ocasiones han fallado de manera temprana frente a la propagación de fisuras.*

*En ese sentido, en el presente estudio se ha evaluado el desempeño de la misma a dicho deterioro, a partir de una elaborada con asfalto convencional, otra fabricada con asfalto modificado con polímero virgen y otra con asfalto con alta tasa de polvo de NFU.*

*En la búsqueda de una mejor respuesta frente a dicha patología, además, se valoraron otras dos mezclas con granulometrías discontinuas elaboradas con los dos mismos asfaltos modificados usados para la arena asfalto. Las determinaciones se han realizado en probetas de tres capas y un equipo de sollicitación dinámica, que permitió realizar una comparación relativa entre las mezclas desde un enfoque tecnológico, dando por resultado que una de las mezclas discontinuas con el asfalto con alta tasa de polvo de NFU, mostró el mejor desempeño frente a la fisuración refleja.*



Universidad Tecnológica Nacional  
FACULTAD REGIONAL CORDOBA



ISBN 978-987-8992-39-6



9 789878 992396