

ESTUDIO DE RIEGOS ASFÁLTICOS DE LIGA ENTRE CAPAS ASFÁLTICAS PARA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES FRESADOS

(Plan de Tesis aprobado por Resolución UTN CS N° 34/2017)

JOSÉ JULIÁN RIVERA

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

(Resolución CS N° 420/15, Resolución CONEAU 573/16, Carrera
N° 4695/15, Categoría A)



Facultad Regional La Plata
Universidad Tecnológica Nacional

ISBN 978-987-1896-98-1
(Segunda Edición)

Editorial edUTecNe

AÑO 2019



Rivera, José Julián

Estudio de riegos asfálticos de liga entre capas asfálticas para rehabilitación de pavimentos flexibles fresados / José Julián Rivera. - 2a edición - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2018.

262 p. ; 26 x 19 cm.

Edición para Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata
ISBN 978-987-1896-98-1

1. Asfalto. 2. Manejo de Materiales. 3. Tecnología de Materiales. I. Título.
CDD 690.01

ISBN 978-987-1896-98-1



* Esta tesis se llevó a cabo en el LEMaC - Centro de Investigaciones Viales (Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional), bajo la dirección del Dr. Ing. Hugo Daniel Bianchetto.

* Adicionalmente cabe destacar que la tesis se desarrolla en el marco del Proyecto I+D, aprobado en el Programa de Incentivos con el Código TVIFILP0004708TC, del cual el Tesista es Director, y que cuenta con la participación de Integrantes de las Facultades Regionales La Plata y Avellaneda de la Universidad Tecnológica Nacional, y de la Universitat Politècnica de Catalunya (España).

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

AGRADECIMIENTOS

* A Hugo Bianchetto, de la Facultad Regional Avellaneda de la Universidad Tecnológica Nacional, por su inestimable y valiosa dirección.

* A los Miembros del Jurado, Dr. Fernando Martínez (UNR), Dr. Adrián Nosetti y Dr. Yury Villagrán Zaccardi, por sus observaciones y comentarios que han sido sumamente enriquecedores para la Tesis.

* A la Dirección del Doctorado y a las Autoridades de la Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional, por facilitar sus instalaciones y equipamiento.

* Al personal del LEMaC - Centro de Investigaciones Viales, por el apoyo y colaboración; entre ellos Gerardo Botasso, Enrique Fensel, Luis Delbono, Luis Ricci, Oscar Rebollo, Enrique Giaccio, Verónica Mechura, Luciano Brizuela, Adrián Oviedo, Gustavo Das Neves, Anael Porro, Carolina Gerardi, Nicolás de Abajo, Matías Fregossi y Nicolás Batistta.

* A Ángel Queizán, de la Facultad Regional La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional, por sus aportes en el modelado numérico de temas abordados.

* A Oscar Giovanon y Marta Pagola, del IMAE de la Universidad Nacional de Rosario, por su asesoramiento en temáticas relacionadas con el análisis estructural de los temas abordados.

* A Adriana Martínez y Rodrigo Miro, de la Universitat Politècnica de Catalunya, por su participación en el proyecto I+D asociado al desarrollo de la tesis y en su producción. Especialmente por sus gestiones para la concreción de la dirección y ejecución del Trabajo Final de Grado de Christian Selk en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC, para quien también va mi agradecimiento. Además, al personal del Laboratorio de Caminos de Barcelona, José Amorós y Jordi Martín.

* A Carlos Del Pozo, en representación de la empresa PROBIAR SA, por facilitar muestras de sus emulsiones asfálticas.

* A Santiago Falabella, en representación de la empresa ICF SA, por permitir la realización de las pruebas de campo en Argentina y a la Inspección de la DVBA por autorizarlas.

* A Jorge Ortiz y Xavier Crisen, en representación de la empresa BENITO ARNÓ E HIJOS SAU, por permitir la realización de las pruebas de campo en España.

* A Dora Hudson por su colaboración en el análisis gramatical y sintáctico del texto.

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

“...comunicaros los descubrimientos que hagáis en vuestro arte y ayudadaros mutuamente...”

Príncipe Edwin (926 d. C.)

INDICE

LISTA DE TABLAS	
LISTA DE FIGURAS	
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. La temática analizada, el enfoque adoptado y su ámbito de aplicación	1
1.2. Marco de referencia conceptual y estado del arte	2
1.3. Objetivos de la tesis	4
1.4. Estructura metodológica	4
1.5. Actividades involucradas	4
2. LA REHABILITACIÓN DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	9
2.1. Los pavimentos asfálticos	9
2.2. El empleo del fresado en la rehabilitación	14
3. ANÁLISIS DE LAS INTERFASES EN LAS REHABILITACIONES.....	33
3.1. Las interfases en los paquetes multicapas	33
3.2. Los modelos estructurales de pavimentos.....	39
3.3. Modelizado mecanicista complejo de la interfase	48
3.4. El procedimiento de ensayo de corte a utilizarse en el estudio.....	55
3.5. Modelado de la interfase fresada en programas de cálculo.....	61
4. ANÁLISIS DEL INCREMENTO DE ÁREA EN LA INTERFASE POR FRESADO ...	67
4.1. Perfiles de la superficie dentada generada por el fresado	67
4.2. En busca de una metodología superadora	69
4.3. Medición de la textura superficial en probetas.....	72
4.4. Aplicación a modelos de superficie de acuerdo al perfil fresado tipo “d”	73
4.5. Corroboración práctica del modelo obtenido	86
5. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE RIEGO DE LIGA PARA LA SUPERFICIE NO FRESADA	97
5.1. Los materiales componentes de los sistemas de refuerzo que implican un riego de liga	97
5.2. Estudio de la dotación óptima del riego de liga para los materiales empleados en esta experiencia	106
6. ANÁLISIS MEDIANTE ENSAYOS EN CASOS CON SUPERFICIES FRESADAS	125
6.1. Análisis de respuesta al corte para la Situación 1	126
6.2. Análisis de respuesta al corte para la Situación 2.....	138
6.3. Análisis de respuesta al corte para la Situación 3.....	143
6.4. Análisis de respuesta al corte para la Situación 4.....	149
6.5. Resumen de resultados y análisis de la situación óptima para cada Caso	154
6.6. Metodología de análisis resultante de los estudios	157
6.7. Forma de empleo en obra de la metodología de análisis resultante	158
6.8. Análisis de respuesta al corte a fatiga	159
7. APLICACIÓN A CASOS REALES DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA....	171
7.1. Análisis de un caso en la Ruta Provincial N° 215 en Coronel Brandsen	171
7.2. Análisis de un caso en una obra en la provincia de Lérida (España)	182
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	193
8.1. Conclusiones.....	193
8.2. Recomendaciones.....	197
ANEXO A – EL FRESADO DE PAVIMENTOS	199
ANEXO B – ENSAYOS PARA CONTROLAR LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS....	205
ANEXO C – RUTINAS MATLAB.....	215
ANEXO D - LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS PARA RIEGOS DE LIGA	225

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Datos para el perfil del surco.....	21
Tabla 2-2. Casos patrones de fresado a ser analizados	22
Tabla 3-1. Factores de conversión para determinar el espesor efectivo	43
Tabla 3-2. Características de los ensayos de corte directo	59
Tabla 4-1. Incremento del área ante combinaciones de d y h.....	69
Tabla 4-2. Mediciones realizadas sobre los testigos	79
Tabla 4-3. Resumen estadístico de las mediciones sobre testigos	81
Tabla 4-4. Dispersiones de la media en los parámetros del perfil de fresado y Relación h_1/h_2 entre medias	82
Tabla 4-5. Casos de simulación y sus dispersiones.....	83
Tabla 4-6. Diámetros de ensayo para distintos volúmenes de arena	83
Tabla 4-7. Resultados obtenidos en las simulaciones.....	85
Tabla 4-8. Registro de Diámetros de Parche de Arena	90
Tabla 5-1. Usos viales de las emulsiones asfálticas catiónicas.....	98
Tabla 5-2. Requisitos de las emulsiones asfálticas	98
Tabla 5-3. Requisitos del residuo de destilación	99
Tabla 5-4. Caracterización de la emulsión para el riego de liga	99
Tabla 5-5. Curvas granulométricas para una mezcla CAC D-19	102
Tabla 5-6. Parámetros WTT exigidos a una mezcla CAC-D19.....	102
Tabla 5-7. Clasificación por tránsito aplicable a una mezcla CAC-D19	102
Tabla 5-8. Dosificación de la mezcla CAC-D19.....	103
Tabla 5-9. Granulometría de los áridos recuperados de la mezcla CAC-D19	104
Tabla 5-10. Parámetros de la mezcla CAC-D19 empleada	105
Tabla 5-11. Dotaciones de riego de liga óptimas habituales	107
Tabla 5-12. Densidades de bases de probetas 1 a 12 y I a III, y su estadística	108
Tabla 5-13. Riego de emulsión asfáltica en probetas 1 a 12 y I a III	109
Tabla 5-14. Densidades de probetas dobles 1 a 12 y I a III, y su estadística	110
Tabla 5-15. Valores promedio obtenidos versus dotación de riego de liga.....	116
Tabla 5-16. Cálculo de dotación de emulsión para probetas IV a VI	117
Tabla 5-17. Valores obtenidos con la dotación de 0,25 l/m ² de riego de liga.....	117
Tabla 5-18. Resultados obtenidos con las probetas A a C mediante el Ensayo LCB	121
Tabla 6-1. <i>CIA</i> a ser utilizados en los ensayos de corte en la Situación 1	127
Tabla 6-2. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 1	127
Tabla 6-3. Densidades de bases de probetas 13 a 30 y su estadística	128
Tabla 6-4. Densidades de probetas dobles 13 a 30 y su estadística.....	132
Tabla 6-5. Resumen de resultados para la Situación 1	138
Tabla 6-6. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 2	139
Tabla 6-7. Resumen de resultados para la Situación 2.....	143
Tabla 6-8. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 3	144
Tabla 6-9. Resumen de resultados para la Situación 3.....	149
Tabla 6-10. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 4	150
Tabla 6-11. Resumen de resultados para la Situación 4	154
Tabla 6-12. Resumen de resultados de <i>Smax</i> para ensayos sobre superficie fresada.....	154
Tabla 6-13. Resumen de resultados de <i>TD</i> para ensayos sobre superficie fresada	154
Tabla 6-14. Valores de <i>CIR</i> versus <i>DPA</i>	158
Tabla 6-15. Riego para la Situación 1 a 4 en probetas prismáticas, Caso 4.....	163
Tabla 6-16. Resultados de la primera serie de probetas	167
Tabla 6-17. Resultados de la segunda serie de probetas	169
Tabla 6-18. Resultados de la tercera serie de probetas	169
Tabla 7-1. Determinación del DPA_{prom} a partir de los <i>DPA</i> medidos	175
Tabla 7-2. Curva de áridos recuperados.....	177
Tabla 7-3. Cálculos para establecer la cantidad de emulsión a aplicarse por testigo	178
Tabla 7-4. Resumen de los resultados de la Dotación I a III	181

Tabla 7-5. Límites granulométricos de una mezcla AC16S	182
Tabla 7-6. Dosificación empleada para la mezcla AC16S	182
Tabla 7-7. Resultados de los ensayos al corte con interfase lisa	186
Tabla 7-8. Cálculos para establecer la cantidad de emulsión a aplicarse por testigo	188
Tabla 7-9. Resultados de las probetas dobles con interfase fresada	190
Tabla D-1. Clasificación de emulsiones y tipos de emulsificantes	228
Tabla D-2. Usos viales de las emulsiones asfálticas catiónicas	229
Tabla D-3. Requisitos de las emulsiones asfálticas	229
Tabla D-4. Requisitos del residuo de destilación.....	230

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Proceso de deterioro y conservación de un pavimento	10
Figura 2-2. Aplicación de un riego de liga	13
Figura 2-3. Esquema de distribución de un riego de liga.....	14
Figura 2-4. Máquina de ensayo de Leutner.....	15
Figura 2-5. Textura generada por el fresado del pavimento	15
Figura 2-6. Obra con alta textura de fresado.....	16
Figura 2-7. Obra con baja textura de fresado.....	16
Figura 2-8. Superficie fresada en frío.....	17
Figura 2-9. Corte de una superficie fresada en frío	17
Figura 2-10. Fresado estándar.....	19
Figura 2-11. Fresado fino.....	20
Figura 2-12. Microfresado.....	20
Figura 2-13. Ejemplo de información de distancia entre surcos del fresado.....	20
Figura 2-14. Ejemplo de perfil de surco relevado.....	21
Figura 2-15. Ejemplo de información respecto de la profundidad de surco habitual....	21
Figura 2-16. Fresado de regulación de una vía.....	22
Figura 2-17. Aplicación de fresado continuo entre cordones cuneta	23
Figura 2-18. Fresado de pavimento con fisuras	24
Figura 2-19. Reciclado de un pavimento.....	25
Figura 2-20. Pavimento ahuellado por inadecuada mezcla asfáltica	26
Figura 2-21. Deterioro de la capa superficial por ampollas	27
Figura 2-22. Superficie con exudación.....	27
Figura 2-23. Superposición de capas sin remoción.....	28
Figura 2-24. Descascaramiento por bajo espesor remanente	29
Figura 3-1. Esfuerzos en una viga a flexión	33
Figura 3-2. Esquema de tensiones en una interfase	34
Figura 3-3. Esfuerzo de corte (τ) vs. esfuerzo normal (σ).....	35
Figura 3-4. Esfuerzos en una capa superficial por el paso de un neumático	36
Figura 3-5. Resistencia al corte para diversos materiales en un riego de liga	39
Figura 3-6. Factores de conversión para un pavimento <i>full depth</i>	42
Figura 3-7. Carta de diseño para <i>full depth</i> con mezcla asfáltica en caliente	42
Figura 3-8. Factores de ajuste por temperatura para una base granular.....	45
Figura 3-9. Relación entre deflexión y ejes equivalentes	46
Figura 3-10. Carta de diseño de refuerzos en ejes equivalentes y deflexiones	46
Figura 3-11. Ejemplo de diagrama carga/deformación en el corte directo.....	51
Figura 3-12. Curvas de trabajo absorbido en tres muestras ensayadas.....	51
Figura 3-13. Gráfica típica de ensayos directos de corte en interfases	52
Figura 3-14. Curva típica de fatiga al corte	53
Figura 3-15. Modelo constitutivo simplificado de la interfase asfalto-asfalto.....	55
Figura 3-16. Diferentes condiciones de carga en la interfase del pavimento	55
Figura 3-17. Métodos de ensayo principales en interfases	56
Figura 3-18. Esquemas de ensayos enunciados.....	57
Figura 3-19. Imagen del tipo de ensayo seleccionado para el estudio	58
Figura 3-20. Ambiente de ensayo climatizado empleado	59
Figura 3-21. Deformación en la zona central de la probeta doble durante el ensayo ..	61
Figura 4-1. Incremento de Area por fresado	67
Figura 4-2. Estimaciones de perfiles de corte por fresado	68
Figura 4-3. Asimilación de la superficie fresada a una curva.....	68
Figura 4-4. Curva representativa de la Ecuación 4-2	69
Figura 4-5. Planta y corte de un testigo extraído de un pavimento fresado	70
Figura 4-6. Realización del Ensayo de Parche de Arena en laboratorio.....	71
Figura 4-7. Imágenes de texturas de pavimentos obtenidas por escaner 3D	72
Figura 4-8. Escaneo de una sección de una probeta asfáltica	73

Figura 4-9. Perfil de simulación en el <i>plano XY</i>	73
Figura 4-10. Equipo de fresado empleado en la Obra A en estudio	74
Figura 4-11. Tipo de equipo de fresado empleado en la Obra B en estudio	74
Figura 4-12. Testigos acondicionados	75
Figura 4-13. Aserrado de testigos	75
Figura 4-14. Secciones por aserrado logradas en el Testigo B	75
Figura 4-15. Sección de análisis 1, Testigo A	76
Figura 4-16. Sección de análisis 2, Testigo A	76
Figura 4-17. Sección de análisis 3, Testigo A	76
Figura 4-18. Sección de análisis 4, Testigo A	77
Figura 4-19. Sección de análisis 5, Testigo A	77
Figura 4-20. Sección de análisis 6, Testigo A	77
Figura 4-21. Sección de análisis 7, Testigo A	78
Figura 4-22. Sección de análisis 1, Testigo B	78
Figura 4-23. Sección de análisis 2, Testigo B	78
Figura 4-24. Sección de análisis 3, Testigo B	78
Figura 4-25. Sección de análisis 4, Testigo B	79
Figura 4-26. Sección de análisis 5, Testigo B	79
Figura 4-27. Sección de análisis 7, Testigo B	79
Figura 4-28. Sección de análisis 8, Testigo B	79
Figura 4-29. Sección de análisis 9, Testigo B	80
Figura 4-30. Gráfica de una distribución normal.....	81
Figura 4-31. Coef. de Incremento de Area versus Diámetro del Parche de Arena	84
Figura 4-32. Moldeo de probetas con <i>Roller Compact</i>	86
Figura 4-33. Simulación del fresado, probeta Caso 1, vista de frente	87
Figura 4-34. Simulación del fresado, probeta Caso 1, vista lateral.....	87
Figura 4-35. Perfil de fresado real versus simulación por aserrado.....	87
Figura 4-36. Probeta Caso 1 a la izq. y Caso 2 a la der.	88
Figura 4-37. Probeta Caso 3 a la izq. y Caso 4 a la der.	88
Figura 4-38. Probeta Caso 5 a la izq. y Caso 6 a la der.	88
Figura 4-39. Relación de escala de los casos de simulación	89
Figura 4-40. Tamizado de la arena Tipo A	89
Figura 4-41. Elementos de ensayo empleados	90
Figura 4-42. Detalle pisón normalizado (izq.) y vol. de ensayo (der.)	90
Figura 4-43. Parche de Arena, probeta Caso 1	91
Figura 4-44. Parche de Arena, probeta Caso 2.....	91
Figura 4-45. Parche de Arena, probeta Caso 3.....	91
Figura 4-46. Parche de Arena, probeta Caso 4.....	92
Figura 4-47. Parche de Arena, probeta Caso 5.....	92
Figura 4-48. Parche de Arena, probeta Caso 6.....	92
Figura 4-49. Análisis comparativo entre la simulación numérica y de laboratorio.....	93
Figura 5-1. Gráfica de los áridos recuperados de la mezcla CAC-D19	104
Figura 5-2. Equipo de <i>Wheel Tracking Test</i> del LEMaC.....	105
Figura 5-3. Curva Deformación (Huella) versus ciclos de carga.....	106
Figura 5-4. Máxima Tensión Tangencial en ensayos al corte.....	107
Figura 5-5. Desmoldado de probetas de base	107
Figura 5-6. Base de las probetas dobles 1 a 12 y I a III	108
Figura 5-7. Aplicación de las dotaciones de riego en estudio.....	109
Figura 5-8. Probetas dobles 1 a 12 y I a III	109
Figura 5-9. Imágenes en vista y planta de la probeta doble con mordazas	110
Figura 5-10. Probeta doble en posición de ensayo	111
Figura 5-11. Curva tensión versus deformación durante el ensayo.....	111
Figura 5-12. Vistas de la rotura en la interfase de una probeta doble	112
Figura 5-13. Resultados para las probetas con dotación 0,0 l/m ²	113
Figura 5-14. Resultados para las probetas con dotación 0,1 l/m ²	113

Figura 5-15. Resultados para las probetas con dotación 0,2 l/m ²	114
Figura 5-16. Resultados para las probetas con dotación 0,3 l/m ²	114
Figura 5-17. Resultados para las probetas con dotación 0,4 l/m ²	115
Figura 5-18. Resultados para las probetas con dotación 0,4 l/m ² corregidos	115
Figura 5-19. Curva <i>S_{max}</i> promedio versus dotación de riego de liga.....	116
Figura 5-20. Probetas dobles IV a VI moldeadas	116
Figura 5-21. Resultados para las probetas con dotación 0,25 l/m ²	117
Figura 5-22. Vistas del Ensayo de SBT	118
Figura 5-23. Ensayo según norma alemana	119
Figura 5-24. Esquema del Ensayo de LCB adaptado a esta experiencia	120
Figura 5-25. Bases y probetas dobles A, B y C.....	121
Figura 5-26. Realización del Ensayo de LCB.....	121
Figura 5-27. Probetas dobles ensayadas mediante el Ensayo de LCB	122
Figura 6-1. Exceso de riego de liga sobre una superficie fresada	125
Figura 6-2. Análisis con lupa de la sección generada	125
Figura 6-3. Disposición del riego lograda en laboratorio	126
Figura 6-4. Base de las probetas dobles 13 a 30	127
Figura 6-5. Aserrado de una probeta del Caso 1	128
Figura 6-6. Aserrado de una probeta del Caso 5	129
Figura 6-7. Probetas 13 a 30 aserradas.....	129
Figura 6-8. Imágenes en planta y perfil de los 6 casos simulados	130
Figura 6-9. Aplicación del riego sobre las probetas fresadas	130
Figura 6-10. Probetas dobles 13 a 30	131
Figura 6-11. Orientación del fresado en el ensayo.....	131
Figura 6-12. Superficie de corte, probeta Caso 1	133
Figura 6-13. Superficie de corte, probeta Caso 2.....	133
Figura 6-14. Superficie de corte, probeta Caso 3.....	133
Figura 6-15. Superficie de corte, probeta Caso 4.....	134
Figura 6-16. Superficie de corte, probeta Caso 5.....	134
Figura 6-17. Superficie de corte, probeta Caso 6.....	134
Figura 6-18. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 1.....	135
Figura 6-19. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 1.....	135
Figura 6-20. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 1.....	136
Figura 6-21. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 1.....	136
Figura 6-22. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 1.....	137
Figura 6-23. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 1.....	137
Figura 6-24. Bases de las probetas antes y después del fresado, Situación 2.....	138
Figura 6-25. Probetas dobles para el análisis de la Situación 2	139
Figura 6-26. Interfase luego del ensayo en los Casos 1 a 6 de la Situación 2.....	140
Figura 6-27. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 2.....	140
Figura 6-28. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 2.....	141
Figura 6-29. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 2.....	141
Figura 6-30. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 2.....	142
Figura 6-31. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 2.....	142
Figura 6-32. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 2.....	143
Figura 6-33. Bases de las probetas antes y después del fresado, Situación 3.....	144
Figura 6-34. Probetas dobles para el análisis de la Situación 3	145
Figura 6-35. Interfase luego del ensayo en los Casos 1 a 6 de la Situación 3.....	145
Figura 6-36. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 3.....	146
Figura 6-37. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 3.....	146
Figura 6-38. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 3.....	147
Figura 6-39. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 3.....	147
Figura 6-40. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 3.....	148
Figura 6-41. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 3.....	148
Figura 6-42. Bases de las probetas antes y después del fresado, Situación 4.....	149

Figura 6-43. Probetas dobles para el análisis de la Situación 4	150
Figura 6-44. Interfase luego del ensayo en los Casos 1 a 6 de la Situación 4.....	150
Figura 6-45. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 4.....	151
Figura 6-46. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 4.....	151
Figura 6-47. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 4.....	152
Figura 6-48. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 4.....	152
Figura 6-49. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 4.....	153
Figura 6-50. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 4.....	153
Figura 6-51. Gráfica S_{max} versus CI en Caso 1 y Caso 2	155
Figura 6-52. Gráfica S_{max} versus CI en Caso 3 y Caso 4	155
Figura 6-53. Gráfica S_{max} versus CI en Caso 5 y Caso 6	155
Figura 6-54. Gráfica TD versus CI en Caso 1 y Caso 2.....	156
Figura 6-55. Gráfica TD versus CI en Caso 3 y Caso 4.....	156
Figura 6-56. Gráfica TD versus CI en Caso 5 y Caso 6.....	156
Figura 6-57. Curva característica de tensión versus deformación obtenida	157
Figura 6-58. Gráfica de CIR versus DPA y función de correlación.....	158
Figura 6-59. Esquema del <i>Shear Fatigue Test</i>	160
Figura 6-60. Ciclo de carga para el ensayo a fatiga	160
Figura 6-61. Esquema del ensayo a fatiga de la interfase del LEMaC	161
Figura 6-62. Bases para las probetas moldeadas con <i>Roller Compact</i>	162
Figura 6-63. Bases para las probetas con fresado simulado para el Caso 4.....	162
Figura 6-64. Probetas dobles prismáticas moldeadas.....	163
Figura 6-65. Probetas cúbicas para el análisis a fatiga, Caso 4	164
Figura 6-66. Escaneo de un corte en sentido transversal al fresado	164
Figura 6-67. Imágenes con lupa de un corte en sentido transversal al fresado	164
Figura 6-68. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas ..	165
Figura 6-69. Detalle de una probeta ensayada a fatiga y su interfase.....	166
Figura 6-70. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la primera serie ...	166
Figura 6-71. Imágenes de la probeta S_{1-2} ya ensayada.....	168
Figura 6-72. Imágenes de la probeta S_{4-2} ya ensayada.....	168
Figura 6-73. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie..	168
Figura 6-74. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie	170
Figura 7-1. Trazado de la RP215	171
Figura 7-2. Sector en el cual se realiza el análisis	172
Figura 7-3. Vista general del sector analizado	172
Figura 7-4. Vista lateral del espesor remanente de mezcla asfáltica.....	173
Figura 7-5. Equipo de fresado utilizado en la obra	173
Figura 7-6. Determinaciones análogas al Ensayo de Parche de Arena efectuadas ..	173
Figura 7-7. Medición de los D_i en la Medición 1	174
Figura 7-8. Medición de los D_i en la Medición 2	174
Figura 7-9. Medición de los D_i en la Medición 3	174
Figura 7-10. Extracción de testigos en el sector en análisis	175
Figura 7-11. Testigos obtenidos acondicionados	176
Figura 7-12. Áridos recuperados de la mezcla asfáltica de los testigos	176
Figura 7-13. Gráfica de la curva de áridos recuperados.....	177
Figura 7-14. Probetas dobles moldeadas a partir de los testigos extraídos.....	178
Figura 7-15. Resultados ensayo de corte Dotación I.....	179
Figura 7-16. Resultados ensayo de corte Dotación II.....	179
Figura 7-17. Resultados ensayo de corte Dotación III.....	180
Figura 7-18. Probetas ensayadas de la Dotación I a III.....	180
Figura 7-19. Gráfica S_{max} versus CI en la Dotación I a III	181
Figura 7-20. Gráfica TD versus CI en la Dotación I a III	181
Figura 7-21. Agregados calizos utilizados en la experiencia	183
Figura 7-22. Equipo para compactación de laboratorio	184
Figura 7-23. Probetas en acondicionamiento a 20 °C	185

Figura 7-24. Equipo de Ensayo de LCB.....	185
Figura 7-25. Probeta ensayada en el equipo LCB.....	185
Figura 7-26. Resistencia al corte versus dotación de riego, interfase lisa	186
Figura 7-27. Detalle de la textura del tramo en estudio una vez fresado.....	187
Figura 7-28. Medición de Parche de Arena y extracción de test. en el tramo en estudio	187
Figura 7-29. Testigos numerados y acondicionados en espesor.....	188
Figura 7-30. Testigos con el riego de liga aplicado	189
Figura 7-31. Probetas dobles parcialmente desmoldadas para su ensayo.....	189
Figura 7-32. Curva de esfuerzo al corte vs. desplazamiento en la interfase, Prob. 5	190
Figura 7-33. Probeta 8 ensayada, base (izq.) y revestimiento (der.)	190
Figura A-1. Fresadora de pequeño porte	199
Figura A-2. Fresadora de mediano porte	200
Figura A-3. Fresadora de gran porte.....	200
Figura A-4. Cilindro de fresado estándar.....	201
Figura A-5. Cilindro de fresado fino.....	201
Figura A-6. Sentido de giro del fresador.....	202
Figura A-7. Diente de corte	202
Figura A-8. Equipo de barrido	203
Figura A-9. Accesorio para barrido	203
Figura B-1. Esquema de solicitud del Ensayo de Francesio	206
Figura B-2. Esquema del Ensayo de LCB.....	206
Figura B-3. Ensayo de corte sobre testigos	207
Figura B-4. Ensayo de torsión sobre testigos.....	207
Figura B-5. Ensayo de tracción sobre testigos	208
Figura B-6. <i>Pull-off Test Method</i>	209
Figura B-7. <i>Wedge Splitting Test</i>	209
Figura B-8. <i>Slant Shear Test</i>	210
Figura B-9. Probeta ensayada mediante el <i>Grzybowska Test</i>	210
Figura B-10. Aplicación del <i>Impact Echo Method</i>	211
Figura B-11. Probeta (izq.) y cámara de ensayo (der.) SST.....	211
Figura B-12. <i>Ancona Shear Testing</i>	212
Figura D-1. Etapas de la rotura de una emulsión	225
Figura D-2. Molécula de un emulsificante catiónico	226
Figura D-3. Mecanismo de estabilización de una emulsión asfáltica.....	226
Figura D-4. Viscosímetro Saybolt Furol	230
Figura D-5. Destilación de una emulsión asfáltica.....	231
Figura D-6. Sistema de destilación	233
Figura D-7. Penetración de un asfalto.....	234
Figura D-8. Ensayo de ductilidad	234
Figura D-9. Ensayo de Oliensis	235

RESUMEN

Cuando un pavimento asfáltico es sometido, durante su etapa de explotación, a una rehabilitación mediante la aplicación de una nueva capa asfáltica superpuesta, elaborada en caliente, es requisito extender sobre éste un riego asfáltico de liga en una dotación dada, lo cual genera una interfase entre las capas.

Si al pavimento existente se le realizan, además, operaciones previas de fresado superficial, las texturas resultantes pueden ser variadas y diferentes a la que presentaría si se tratara de una superficie sin fresar; lo cual incide en esa dotación de riego de liga a aplicarse en la interfase. Esto se debe a que, por un lado, al fresar se produce un incremento de superficie en la interfase entre ambas capas, lo que podría llevar a la necesidad de aumentar la dotación del riego de liga a emplearse. Por otro lado, se debe considerar que por causa del fresado se forman surcos paralelos longitudinales, que pueden producir el escurrimiento del riego asfáltico incrementado desde sus cumbres hacia sus valles; lo que podría generar una deposición excesiva en estos últimos.

El problema planteado permite observar que es necesario llegar a una solución de compromiso intermedia entre ambas situaciones, que permita alcanzar un comportamiento óptimo.

Ese comportamiento óptimo puede lograrse analizando la respuesta mecánica de la interfase ante diversas dotaciones de riego. Se estudia entonces, desde el punto de vista mecánico, cómo debe encararse la situación planteada y cuáles son los parámetros decisivos en análisis. Luego, se procede al diseño de un procedimiento de elaboración de los especímenes en estudio y al desarrollo de la sistemática de ensayo, con su posterior aplicación.

Además, se establece que las dotaciones de riego de liga en estudio pueden ser estimadas en función de proporcionalidades respecto del incremento de la superficie de la interfase debido a la operación de fresado. Para hallar una vía que permita estimar la magnitud de ese incremento de la superficie, en función del grado de textura generado por el fresado, se desarrolla, mediante simulación numérica basada en registros de campo, una adaptación al Ensayo de Parche de Arena. Esta metodología se verifica por medio de aplicaciones en situaciones de laboratorio que buscan reflejar el espectro de texturas obtenibles en obra.

Luego, se estima a través de ensayos con sollicitación estática al corte, tanto en situaciones de interfase lisa como en aquellas en las cuales se simulan en laboratorio diferentes grados de fresado, la dotación de riego de liga óptima expresada en términos del incremento de superficie. Se arriba así a un modelo de aplicación en campo para establecer ese contenido óptimo de riego de liga a ser utilizado y a su procedimiento de aplicación. Esta investigación se realiza sobre los materiales característicos de la región central de la Argentina, empleados en los casos que implican las tareas de rehabilitación con fresado de la capa existente y la aplicación de una mezcla asfáltica en caliente con aporte estructural.

Como alternativas para la validación del modelo y el procedimiento desarrollados, se abordan tres líneas de estudio. La primera, se basa en el análisis de la resistencia a la fatiga del sistema mediante sollicitaciones dinámicas sobre un grado de textura determinado de la interfase. La segunda, se basa en la aplicación del modelo y el procedimiento en una obra de rehabilitación en la provincia de Buenos Aires, sometiendo a muestras testigos extraídas de la obra, a la sistemática de ensayo propuesta. La tercera, se basa en la aplicación del modelo sobre otra tipología de materiales y procedimiento de ensayo, específicamente, las utilizadas típicamente en obras de rehabilitación en Cataluña (España).

Finalmente, se vuelca como conclusión más relevante el modelo desarrollado que relaciona el coeficiente de incremento de riego a ser aplicado en función del diámetro de parche de arena resultante al analizar la superficie fresada y se elaboran recomendaciones para futuros análisis relacionados con la temática.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. La temática analizada, el enfoque adoptado y su ámbito de aplicación

La existencia de estructuras viales adecuadas resulta de suma trascendencia para el desarrollo tanto de un país como de sus economías regionales (Giovanon y Buono, 2008).

La superficie de rodamiento de una vialidad ha de proporcionar una conducción cómoda y segura al usuario. Una vez que ha sido ejecutada comienza su fase de explotación. En ésta se desarrollan dos tipos de actividades: unas dirigidas al servicio que presta la vialidad y otras dirigidas al mantenimiento y rehabilitación de la propia infraestructura. Mientras que las primeras están relacionadas con la información a los usuarios y a su uso; las segundas incluyen intervenciones físicas, cuya finalidad es dotar nuevamente a las vías de sus condiciones iniciales, ya que las capas superficiales se deterioran por la acción conjunta del tránsito y las condiciones climáticas (Martínez-Echevarría, 2012).

Estas rehabilitaciones de pavimentos han formado parte de la ingeniería a lo largo de la historia. Los inicios de las capas de refuerzo datan de alrededor del año 1913, con el avance en su aplicación hasta 1981, cuando surge un nuevo concepto de adherencia entre la carpeta existente y la nueva capa a colocar, sin embargo su aceptación y estudio data sólo de unos pocos años (Espinoza, 2015).

Entre los casos de rehabilitación se encuentran aquellos en los cuales las evaluaciones superficiales y estructurales de un pavimento, establecen la necesidad de eliminar parte de la capa de rodamiento, lo cual en la ingeniería vial se realiza mediante el empleo de técnicas de fresado del pavimento (NCHRP, 2004). Esta necesidad puede deberse en muchos casos a su excesiva deformación transversal, que genera el fenómeno conocido como de roderas o ahuellamiento, y al envejecimiento del mismo por la acción climática y la sollicitación del tránsito, con la potencial pérdida de agregados superficiales, entre otras condiciones de deterioro, que pueden llevar a la decisión de fresar (Miller y Belinger, 2003). Por esta vía, además, se elimina el fenómeno de recrecido, que puede llevar a disminuciones en los gálibos (Martínez-Echevarría, 2012).

El fresado, que implica el empleo de equipos del tipo rotatorio provistos de herramientas de desbaste, es una técnica común en los procesos de restauración de pavimentos deteriorados. Dicha tarea da como resultado la atenuación de la sobrealtura en el pavimento, la facilitación del drenaje superficial y la disminución del efecto de la propagación de fisuras (Bonfim, 2008; Rodríguez y Rodríguez, 2004).

Las herramientas de desbaste poseen diferentes características, dando lugar, según la textura resultante en la vía, a diversas tipologías de fresado. Entre estas tipologías se encuentran aquellas en las cuales la aplicación posterior de una nueva capa de revestimiento resulta aceptable y otras, en las que no (Bonfim, 2008). Las primeras constituyen el campo de estudio planteado en esta tesis.

En cualquiera de las tipologías de fresado aptas para la aplicación de un refuerzo, la superficie resultante presenta una textura muy diferente a la que podría hallarse en la superficie de rodamiento original de una capa asfáltica, ya que esta última, en términos relativos, resulta "lisa" (Wirtgen, 2015).

En los casos de refuerzo de pavimentos asfálticos con una mezcla asfáltica en caliente, como los abordados en esta tesis, corresponde disponer un riego de liga,

consistente en la aplicación de una emulsión asfáltica sobre la superficie fresada, con el objetivo de conseguir su unión con la capa de revestimiento asfáltica que se vaya a ejecutar, para establecer una adecuada interfase (Bussard, 2014). Esta técnica de rehabilitación con capas adheridas se aplica en casos en los cuales se desea eliminar deterioros superficiales y el pavimento existente presenta una buena condición estructural (Espinoza, 2015).

Si la adherencia en la interfase es inadecuada, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tránsito se incrementan y, consecuentemente, se reduce la vida útil del pavimento (Montetrusque et al., 2015).

Se debe profundizar el análisis de la aplicación de los riegos de liga sobre las superficies asfálticas fresadas, dadas las condiciones particulares que éstas presentan, de acuerdo a lo que se ha expuesto.

El campo de análisis es la rehabilitación de pavimentos con capas asfálticas en caliente, la cual se incluye en las políticas de conservación y mantenimiento vial, llevadas adelante por las reparticiones públicas (del ámbito, nacional, provincial o local) en sus redes viales urbanas y rurales; o por privados, en la materialización de estas tareas en redes viales de parques industriales, terminales de transporte (puertos, playas de quiebre de carga, estaciones, etc.), barrios cerrados, etc., por ejemplo.

1.2. Marco de referencia conceptual y estado del arte

Se tiene referencia de pocos estudios en los cuales el análisis se efectúa al tener en cuenta que sobre la capa existente se realiza un fresado superficial, y menos en cuanto a la realización de esos estudios adaptados a los materiales empleados en la Argentina (Campana y Rozada Peret, 2004).

Uno de los puntos principales analizados en la tesis es el de establecer un contenido óptimo del riego de liga, en función de las características propias de la superficie fresada a reforzarse.

Como ya se adelantara, en un sistema multicapa los movimientos relativos entre las capas componentes originan fisuras. Cuando la adherencia entre las capas no es buena, la carpeta de rodamiento suele fisurarse de manera temprana ante las sollicitaciones del tránsito. Esta falta de vínculo se traduce también, en una mala o nula distribución de tensiones en el espesor total del pavimento (Ricci, 2011).

Una vía para establecer el contenido óptimo de riego de liga a ser aplicado en un caso en estudio, es el empleo de un ensayo de valoración de la adherencia y el análisis de los resultados que se obtienen. Para ello existen numerosos ensayos de valoración de la adherencia, sin embargo, los distintos investigadores de la temática no se han puesto de acuerdo, hasta el momento, en cuanto a cuál utilizar para evaluar la calidad de la adherencia o liga entre capas (Ricci, 2011).

Si se parte del conocimiento de la dotación óptima de un riego de liga aplicado en una interfase lisa, para un caso en particular de materiales constituyentes de una rehabilitación, un aspecto de interés es el de establecer en qué proporción sería necesario su incremento si debiera ser aplicado en una interfase fresada. Esto se debe a que al fresar se genera una superficie con algún tipo de ondulación, mayor que su componente proyectada (Montetrusque et al., 2015).

En tal sentido, resulta factible avanzar hacia la estandarización de una metodología que permita establecer este incremento de superficie, con la correspondiente necesidad potencial de aumento de la dotación del riego en alguna proporción. Esto puede efectivizarse mediante el abordaje de una técnica basada en experiencias realizadas en algunos estados de Estados Unidos, como por ejemplo Rhode Island y otros, donde se emplea como metodología para establecer la textura de una superficie fresada, la de desparramar una cantidad dada de microesferas de vidrio en un sector de la superficie, con un palo de hockey sobre hielo y movimientos circulares. Si la superficie sobre la que se distribuyen las esferas posee menos de un determinado diámetro, entonces la superficie que se ha logrado no permite optimizar el empleo de un espesor de una capa de revestimiento, por resultar con una textura excesiva (The Asphalt Contractor, 2011).

En base al ensayo descrito, se piensa que pueden dirigirse los esfuerzos a la adaptación de un método de ensayo de amplia difusión en el medio vial, como es el caso del Ensayo del Parche de Arena. Este método fue originalmente empleado en la determinación de la macrotextura de un pavimento, y consiste en la distribución de un volumen conocido de una arena de río de grano redondeado o microesferas de vidrio de granulometría normalizada sobre una superficie en análisis, empleando a tal efecto un pisón provisto de una superficie de goma (IRAM, 1997), y de allí la analogía.

Finalmente, se efectúa el análisis de implicancias de una interfase fresada desde el punto de vista del diseño estructural de pavimentos. Esto se debe a que una superficie fresada incide de diferente manera en la interfase que una superficie lisa (EICAM, 1998; Uzan et al., 1978), a lo que se suma la existencia de diversas tipologías de fresados (amplio rango en la profundidad de los surcos y en la separación de los mismos) con diversos grados de esa incidencia desde el punto de vista estructural (Brown y Brunton, 1984).

Las guías de diseño actuales, como la *Guide for Mechanistic-Empirical Design* (NCHRP, 2004), cuentan con herramientas que estudian las respuestas de los pavimentos a las solicitaciones del tránsito, mediante la inclusión de los casos de rehabilitación de éstos con espesores de mezclas asfálticas. Estos estudios se aplican en alternativas de diseño por metodologías mecánico-empíricas, mediante la definición de categorías funcionales de las vías (Giovanon y Pagola, 2012; Yoder y Witczak, 1975). Estas categorías funcionales se relacionan con las propiedades de la textura superficial, ya que esa textura define la resistencia friccional del pavimento asfáltico a ser reforzado y la respuesta estructural de la interfase ante diferentes temperaturas y frecuencias de carga (Zornberg, 2015). Esta tesis busca en las diversas tipologías de fresado justamente esas diferentes “texturas”.

Para conducir los análisis en el sentido, se emplean procedimientos de ensayo que contemplan la confección de probetas en las cuales se incluye la capa de base asfáltica fresada, el riego de liga y la capa asfáltica de refuerzo. Las probetas así confeccionadas se someten para establecer la capacidad de deformación y la resistencia al corte de la interfase en análisis ante las solicitaciones de un ensayo, que simulan la carga del tránsito.

Con este marco temático genérico, se redactan los objetivos generales y particulares de esta tesis.

1.3. Objetivos de la tesis

1.3.1. Objetivo general

Investigar la aplicación óptima de los riegos de liga sobre pavimentos asfálticos fresados, a fin de su refuerzo con capas asfálticas en caliente, en base a particularidades de los materiales y su implicancia estructural.

1.3.2. Objetivos particulares

- Establecer una metodología de estimación del incremento de la superficie a ser tratada con el riego de liga, respecto de una superficie lisa, en función de la textura producida por la aplicación de procesos de fresado en la capa de pavimento asfáltico a ser reforzada.
- Analizar la dotación óptima requerida de riego de liga en función de los materiales a ser empleados, cuando la interfase es del tipo no fresada.
- Analizar cómo esa dotación óptima debe o no ser corregida, en función de la magnitud del incremento de superficie cuando la interfase es del tipo fresada.

1.4. Estructura metodológica

La secuencia metodológica del desarrollo de la tesis es la siguiente:

- Diseño de sistemas de refuerzo de capas asfálticas con empleo de un riego de liga, para establecer el contenido óptimo del mismo en función de los resultados alcanzados en la solicitud de estos sistemas.
- Estudio de la incidencia de fresados con diferentes profundidades y anchos de surco en la dotación del riego de liga a ser aplicado.
- Materialización en laboratorio de los sistemas de refuerzos en casos de una interfase no fresada y en casos de una interfase fresada con diferentes profundidades y anchos de surcos, y la aplicación de diversas dotaciones de riego de liga.
- Solicitud de los sistemas de refuerzo materializados para la observación de los parámetros de interés y desarrollo de las conclusiones.
- Corroboración en campo de las conclusiones arribadas en laboratorio.
- Conformación de los modelos numéricos de aplicación que relacionen las correcciones de dotación de riego de liga en función de los parámetros que se midan sobre la superficie fresada y que surjan de los resultados obtenidos en la aplicación de los pasos descriptos.
- Presentación de los resultados y aplicación.

1.5. Actividades involucradas

Para alcanzar los objetivos planteados, se realizan las siguientes actividades:

1.5.1. Recopilación de antecedentes

Se efectúa la recopilación de antecedentes, con su correspondiente análisis. Dicha recopilación abarca a los refuerzos con pavimentos asfálticos de vías fresadas con espesores remanentes de pavimento, las técnicas de aplicación de riegos de liga y la determinación de sus características y dotación, las metodologías de ensayos estáticos y dinámicos de materiales aplicables a tal efecto y las metodologías de correlación de los datos resultantes de estos ensayos.

1.5.2. Desarrollo de los procedimientos de trabajo

Teniendo en cuenta los antecedentes recopilados de interés, se procede al desarrollo de los procedimientos a ser empleados en las tareas de campo, laboratorio y gabinete, en pos de obtener datos comparables y conclusiones válidas.

1.5.3. Diseño y materialización de las muestras de prueba

En base a los procedimientos para la realización de las diversas pruebas de laboratorio diseñadas y con las combinaciones de los materiales, técnicas de fresado y espectros de respuestas estructurales esperables, se procede a la confección de las muestras de laboratorio a ser analizadas, a fin de alcanzar los objetivos establecidos a tales efectos.

Además, se realiza la caracterización de los materiales empleados en la tesis (base fresada, capa de refuerzo asfáltica en caliente y riego de liga).

1.5.4. Realización de los ensayos en laboratorio y simulaciones en gabinete

A partir de los procedimientos diseñados se aplican los ensayos en laboratorio, consistentes principalmente en la medición de las respuestas ante las sollicitaciones de la interfase entre las capas de base y refuerzo. Se desarrolla e instrumenta para ello el equipamiento necesario para cubrir el amplio espectro de análisis planteado. Se realizan, además, las simulaciones que permiten complementar las observaciones obtenidas.

1.5.5. Análisis de validez estadística de la matriz de datos

En las distintas etapas de la tesis se realizan diferentes análisis estadísticos de los datos recolectados, a fin de alcanzar inferencias válidas a partir de los mismos.

1.5.6. Desarrollo de los modelos y procedimientos resultantes

Con los parámetros obtenidos de los ensayos y simulaciones se efectúan los análisis de correlación, para de esta forma obtener por regresión las leyes de variación que mejor ajusten a las nubes de puntos. Para esto se emplean análisis de regresión, con las correspondientes pruebas y validaciones necesarias.

Se efectúan las pruebas de corroboración en campo, en busca de ratificar los modelos de laboratorio.

Mediante los resultados alcanzados se procede finalmente a la redacción de los procedimientos y modelos que surgen de las investigaciones efectuadas.

Referencias

BONFIM, V., "Fresado de pavimentos asfálticos", Editorial Exceção, primera edición, Brasil, 2008.

BROWN, S.F., BRUNTON, J.M., "The influence of bonding between bituminous layers", Highways Transportation, 31(5), 16-17, EEUU, 1984.

BUSSARD, M., "Milling & Micro Milling", P.R. Systems Inc., EE UU, 2014.

CAMPANA, J.M., ROZADA PERET, B., “Consideración de la adherencia entre capas asfálticas en el análisis estructural”, XXXIV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Mendoza, Argentina, 2004.

DELBONO, H.L., “Estudio de Grillas Poliméricas en Sistemas Anti-reflejo de Fisuras bajo Solicitaciones Dinámicas”, Tesis Doctoral en Ingeniería mención Materiales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (inérita), 379 p. La Plata, Argentina, 2014.

EICAM, “Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93”, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.

ESPINOZA, M., “Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos”, Revista Infraestructura Vial (ISSN 1409-4045), Universidad de Costa Rica, volumen 17, número 30, diciembre, Costa Rica, 2015.

GIOVANON, O., BUONO, F., “Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional”, XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.

GIOVANON, O., PAGOLA, M., “Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles desarrollado en Argentina”, Revista Carreteras, Asociación Argentina de Carreteras, número 208, diciembre, pp 76-86, Argentina, 2012.

IRAM, “Norma IRAM 1850: Agregados. Método de determinación de la profundidad de la macrotextura superficial de un pavimento mediante el círculo de arena”, Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1997.

MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M.J., “Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa”, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012.

MILLER, J., BELLINGER, W., “Distress identification manual for the long-term pavement performance program”, fourth revised edition, report n° FHWA-RD-03-031, Washington DC, EEUU, 2003.

MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F., TEORO CARMO, C.A., “Avaliação da aderência de geogrelhas entre camadas asfálticas”, Memórias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.

NCHRP, “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”, National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.

RECASENS, R., “Riegos de adherencia. Materiales y ensayos de control”, apunte de cátedra, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2009.

RICCI, L.A., “Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético”, Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.

RODRÍGUEZ, C.E., RODRÍGUEZ, J.A., “Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método de reciclaje”, Tesis de Grado en Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, El Salvador, 2004.

SILFWERBRAND, H., BEUSHAUSEN, H., COURARD, L., "Bonded cement-base material overlays for the repair, the lining or strengthening of slabs or pavements", RILEM State of the Arts Reports, Springer Netherlands, 3 (1), 51-79, doi: 10.1007/978-94-007-1239-3, Holanda, 2011.

THE ASPHALT CONTRACTOR, "How Micromilling is Saving States Money on Asphalt Road Repairs", The Asphalt Contractor Magazine, 30 de noviembre de 2011. [Consultado 12 de diciembre de 2016 en: <http://www.forconstructionpros.com/article/10456001/how-micromilling-is-saving-states-money-on-asphalt-road-repairs>]

UZAN, J., LIVNEH, M., ESHED, Y., "Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers", Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, St. Paul, Minn, 47, 495-521, EEUU, 1978.

WIRTGEN, "El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen", Wirtgen Group Company, Alemania, 2015.

YODER, E.J., WITCZAK, M.W., "Principles of pavements design", John Wiley & Sons Inc., Second Edition, EEUU, 1975.

ZORNBERG, J., "Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos", University of Texas at Austin, EEUU, 2015.

2. LA REHABILITACIÓN DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

2.1. Los pavimentos asfálticos

La vialidad es el principal medio de desplazamiento de viajeros y de la distribución de mercancías. Al conectar núcleos de población y de producción con grandes ciudades, en una sociedad que intercambia cada vez más bienes y servicios, la importancia de las vialidades se ha incrementado notablemente, convirtiéndose en verdaderas impulsoras de la competitividad de la economía y, también, el desarrollo social (Martínez-Echevarría, 2012).

Para otorgar adecuadas condiciones y estándares a la circulación, esas vialidades se encuentran pavimentadas. Estos pavimentos pueden clasificarse como del tipo flexible (con la capa de rodamiento constituida por una mezcla asfáltica), semiflexible (con la capa de rodamiento asfáltica de espesor superior a 15 cm y una base granular), semirrígido (con la capa de rodamiento asfáltica y una base con aglomerante hidráulico) o rígido (con la capa de rodamiento de hormigón) (AASHTO, 1993).

Los pavimentos flexibles y semiflexibles son conocidos habitualmente en forma genérica como “pavimentos asfálticos”, dado el ligante asfáltico empleado en su constitución. Éstos basan su comportamiento en su capacidad de deformación ante la sollicitación de las cargas del tránsito y las cargas térmicas. Para absorber tales cargas, dichos pavimentos suelen constituirse de varias capas, las cuales poseen propiedades resistentes diferentes, habitualmente con una disminución en su calidad a medida que aumenta la profundidad dentro del paquete estructural (EICAM, 1998).

Los materiales asfálticos que componen estos pavimentos han de ser capaces de soportar las cargas y resistir las tensiones producidas con deformaciones tolerables. Esta propiedad se denomina estabilidad y representa la resistencia intrínseca del material, es decir, la combinación de su rozamiento interno y de su cohesión. Además, las mezclas asfálticas deben presentar otras características de importancia, entre las que se pueden mencionar la resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia a la disgregación, resistencia a la fatiga, flexibilidad, adecuada resistencia al deslizamiento, impermeabilidad en el caso de las mezclas cerradas, permeabilidad en el caso de las drenantes y una resistencia adecuada a los agentes externos (durabilidad) (Martínez-Echevarría, 2012).

2.1.1. El deterioro de los pavimentos asfálticos

El objetivo fundamental del pavimento de una vialidad es prestar a los usuarios un servicio de calidad que satisfaga sus necesidades de movilidad. Para ello, una vez creada la infraestructura, se deben realizar una serie de actividades de conservación ante su deterioro por acción del tránsito y de los agentes atmosféricos (Martínez-Echevarría, 2012). Es necesario invertir para mantener las características iniciales de un pavimento, ya que su insuficiente conservación termina por ocasionar sobrecostos en los usuarios de la vía (Vasallo Magro, 2001).

Cabe acotar que un pavimento asfáltico puede fallar tanto de forma funcional como estructural, por lo que las operaciones para su conservación son fijadas en función del estado que presente y los niveles de servicio y prestaciones previstas tras su rehabilitación. Estas operaciones pueden ser tanto reparaciones de pequeñas fallas o mejoras de las características funcionales del pavimento (operaciones sin aporte estructural), como mejoras conjuntas de su capacidad estructural y su estado funcional (refuerzo de pavimentos asfálticos) (Yoder et al., 1975; Martínez-Echevarría,

2012). En la Figura 2-1 se observa la curva típica de deterioro para un pavimento asfáltico, en relación con las intervenciones practicables.

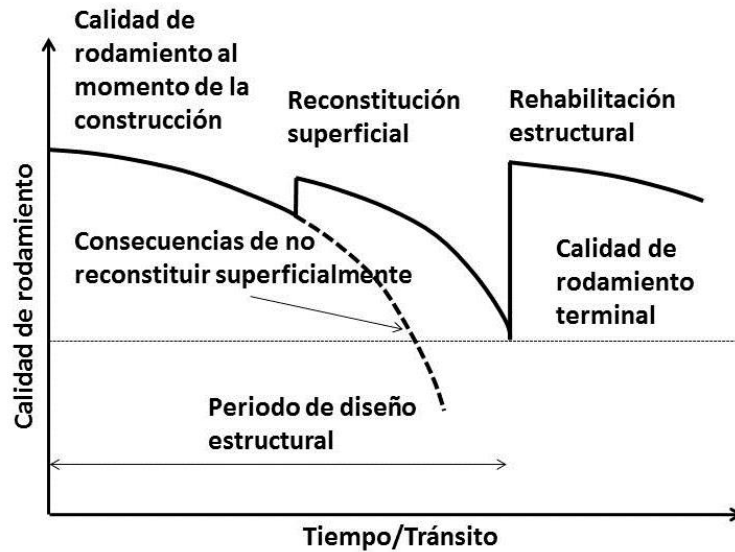


Figura 2-1. Proceso de deterioro y conservación de un pavimento
Fuente: elaboración propia

Los deterioros que pueden observarse comúnmente en un pavimento asfáltico son (Espinoza, 2015):

- Ahuellamiento: debido a la producción del asentamiento de los materiales bajo un tránsito pesado y canalizado.
- Fatiga: fisuras interconectadas formando bloques angulosos, producto de cargas repetidas de tránsito.
- Fisuras en bloque: dividen el pavimento en bloques rectangulares, causadas principalmente por contracción y oxidación de la mezcla asfáltica.
- Exudación: subida de los excedentes de material asfáltico a la superficie de la calzada.
- Agrietamiento en los bordes: corresponden a fisuras continuas que cruzan el borde del pavimento, adyacente a las banquetas.
- Fisuras longitudinales: paralelas a la línea central del pavimento, localizadas dentro del carril.
- Fisuras transversales: perpendiculares a la línea de centro del pavimento.

Para establecer en cada tramo de vía en particular las tipologías de deterioro predominantes y su magnitud, es necesaria una evaluación acertada de la condición existente (NCHRP, 2004). La medición de la severidad puede establecerse por niveles de acuerdo al Manual de Identificación de Deterioros (Miller y Bellinger, 2003), en el cual los niveles detectados son: bajo, moderado y alto; cada uno de ellos para cada tipo de deterioro. La evaluación visual de la condición del pavimento se puede realizar también mediante el uso del Índice de Condición del Pavimento (PCI, por su sigla en inglés), el cual, es un índice que varía entre 0 y 100, estableciéndose un valor de 0 para pavimentos fallados (mal estado) y de 100 para pavimentos en perfecto estado, según la Norma ASTM D6433-11.

2.1.2. Volver a las condiciones iniciales

Algunas de las operaciones habituales de conservación que se llevan a cabo con más frecuencia en los pavimentos asfálticos son los bacheos, saneamientos, reparación de bordes, sellado de fisuras y juntas, eliminación de exudaciones y fresados localizados. El segundo nivel de conservación lo ocupan las rehabilitaciones, a las que se recurre cuando el paso del tránsito y las acciones climáticas han provocado una disminución apreciable de las características iniciales del pavimento o cuando se requiere hacer frente a nuevas solicitudes no contempladas con anterioridad. Estas rehabilitaciones estructurales se pueden llevar a cabo mediante un refuerzo o recrecido del pavimento. La técnica consiste en extender sobre el pavimento antiguo una o varias capas de materiales nuevos con un espesor suficiente para producir un aumento significativo de la capacidad estructural. En ocasiones, el mero recrecido presenta el inconveniente de que los deterioros de las capas antiguas son de tal magnitud que acaban reflejándose en la superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzo (Martínez-Echevarría, 2012).

Los más recientes programas que abordan la rehabilitación de pavimentos se basan en un esquema de evaluación que presenta las siguientes etapas (Bolzán, 2016):

- Identificación del tipo de pavimento y categorización de las fallas existentes en el mismo.
- Análisis del estado del pavimento.
- Selección del tipo de renovación a adoptar y su aplicación.

Al hablar de las alternativas para la rehabilitación de los pavimentos, es importante conocer los principales tipos de capas de refuerzo existentes, las cuales se pueden clasificar en adheridas y no adheridas. Las primeras de ellas son de especial interés para esta tesis, pues se usan cuando se desean eliminar deterioros superficiales y el pavimento existente presenta una buena condición estructural. En esta tipología de capas de refuerzo, la adherencia permite que el conjunto de capas trabaje como un pavimento monolítico. Por lo tanto, es necesario preparar adecuadamente la superficie sobre la que se va a colocar la nueva capa (Espinoza, 2015).

En las estructuras con una carpeta de rodamiento y una base de concreto asfáltico sin ligar, la vida útil se acorta hasta niveles del 25 %, con respecto al caso en que se encuentran correctamente ligadas (Giovanon y Buono, 2008).

2.1.3. Los refuerzos con riegos de liga

Dada la condición de “adherida” requerida para la aplicación abordada, cabe señalar que la normativa vigente en Argentina establece un vocabulario común y entendible para las distintas disciplinas respecto del concepto de adherencia. De esta forma se define al término “adhesión” como el estado en el cual dos superficies se mantienen unidas por: a) fuerzas de atracción; b) fuerzas de entrelazado mecánico (IRAM, 1998). La “adherencia”, por su parte, es la fuerza unitaria aplicada (como tensión, compresión, corte, etc.), requerida para romper un ensamble, cuando la falla se encuentra en o cerca del plano de la unión. A esta definición vale aclararle que la fuerza unitaria se calcula por unidad de área del plano que se desea evaluar. Una fuerza por unidad de área da como resultado una tensión que podrá ser cortante, de tracción, o de torsión según sea el esfuerzo aplicado al espécimen evaluado. El “adherendo” es el cuerpo unido a otro por un adhesivo; es decir, en los paquetes estructurales de pavimentos, los sustratos o capas asfálticas que deben estar íntimamente unidas entre sí. El “adhesivo estructural” es aquel capaz de soportar y transmitir cargas elevadas para mantener una estructura sometida a tensiones. La

“interfase” es una junta adhesiva, región de medidas finitas que se extiende desde un punto en el adherendo donde las propiedades puntuales comienzan a diferenciarse de las propiedades globales, hasta el punto donde las propiedades puntuales igualan las propiedades globales del adhesivo. Por su definición, resulta un tanto impreciso delimitar con exactitud la región abarcada por una interfase, sin embargo, y en el sentido práctico, suele utilizarse como tal a aquella zona dentro de los 10 mm alrededor del plano de unión en sí.

En resumidas cuentas, la adherencia puede ser percibida desde dos ángulos: en primer lugar, el de las condiciones y cinética de unión de dos materiales, de acuerdo a los mecanismos a utilizar; y en segundo lugar, el de la medida de la magnitud de adición, comúnmente expresada en esfuerzo o energía requerida para separar los dos materiales (Silfwerbrand et al., 2011).

En los casos de los refuerzos de pavimentos asfálticos adheridos, corresponde disponer un riego de liga, consistente en la aplicación de una emulsión asfáltica sobre la superficie existente, con el objetivo de conseguir su unión con la capa de revestimiento asfáltica en caliente que se vaya a ejecutar con posterioridad, para establecer una adecuada interfase (Bussard, 2014; Yaacob et al., 2014).

La adherencia lograda entre la carpeta asfáltica en caliente a ser colocada y la ya existente es de suma importancia para posibilitar un apropiado comportamiento de la estructura. No lograr una buena adherencia entre estas capas, implica la imposibilidad de una adecuada transmisión de las tensiones actuantes en el pavimento a la capa subyacente, con el consecuente incremento de las tensiones de tracción en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica y la fisuración prematura por fatiga de la misma (Giovanon y Buono, 2008; Maroni, 1993). Si la adherencia en la interfase es inadecuada, las tensiones y las deformaciones generadas por efecto del tránsito se incrementan y, consecuentemente, se reduce la vida útil del pavimento (Montetrusque et al., 2015).

Los tres requisitos esenciales para los riegos de liga como los mencionados son que deben ser muy finos, generar una cobertura uniforme de la superficie a ser pavimentada y deben cortar o curar antes que la capa de refuerzo sea colocada (Huang, 2004; Bianchetto, 2017). Para profundizar en estos requisitos, se puede decir que el riego de liga debe cumplir con (Giovanon y Buono, 2008; White, 2015):

- Dosificación de ligante asfáltico adecuada: las cantidades de emulsión a utilizar son las necesarias para garantizar la adherencia, siempre de acuerdo a la superficie a tratar. Un exceso de ligante podría producir exudación a través de la capa superior o actuar como lubricante, lo que provocaría corrimientos de las capas debido a esfuerzos tangenciales producidos por el tránsito. Las dosificaciones de residuo asfáltico usualmente empleadas varían entre 0,12 l/m² y 0,40 l/m².
- Uniformidad de la película asfáltica en toda la superficie sobre la que se ejecuta la nueva capa: el método de colocación debe garantizar una capa de adherencia continua y homogénea.
- Tiempo de rotura de la emulsión: se debe respetar el tiempo requerido entre la aplicación del riego asfáltico y el inicio de los trabajos de colocación de la capa subsiguiente, que es función del tipo de ligante utilizado y de las condiciones ambientales. Puede variar desde 20 minutos a varias horas.
- Condición de la superficie de apoyo: la superficie de apoyo de la capa a ejecutar debe garantizar condiciones de absoluta limpieza, sin restos de polvo, material de fresado u otros elementos que pueden encontrarse con frecuencia.

La cantidad de ligante asfáltico residual sobre la superficie del pavimento es el factor más importante en la obtención de un vínculo adecuado entre la superficie del pavimento existente y la nueva capa de mezcla asfáltica. En consecuencia, la tasa de aplicación de una emulsión utilizada como riego de liga debe basarse en la cantidad deseada del residuo asfáltico estipulada por las Especificaciones Particulares de la obra. Esta diferenciación entre la dotación de emulsión y de residuo asfáltico resulta importante tenerla presente y se recomienda que en todos los casos sea empleado el término “dotación” refiriéndose al residuo asfáltico netamente proporcionado (Ricci, 2011).

Como la aplicación del riego de liga debe ser uniforme sobre toda la superficie que queda en contacto con el refuerzo, se debe tener pleno conocimiento del caudal de erogación de la bomba dispersora y un adecuado control de la velocidad de avance del camión regador (Bianchetto, 2017). Este último posee en su parte posterior una barra pulverizadora donde se alojan las boquillas dispersoras. La altura de esa barra debe ser la adecuada para brindar una correcta y uniforme cobertura de la superficie. Es recomendable obtener riegos con cobertura doble o triple, como así también es esencial la orientación de las boquillas, las cuales deben permanecer paralelas entre sí y con un ángulo de inclinación que forme aproximadamente 60° a 75° con el eje demarcado por el sentido de avance del camión (Ricci, 2011). En la Figura 2-2 se observa la aplicación de un riego y en la Figura 2-3 se da un esquema de cómo ese riego se superpone en función de la altura de la barra empleada.

Se ha mencionado que la superficie donde se aplica el riego de liga debe estar perfectamente limpia y firme, con ausencia de polvo, basura, humedad, manchas de combustibles, solventes (u otros derrames) y sin desprendimientos. Por ello, en el caso de ser necesario, se debe barrer la superficie en el momento previo al riego. El procedimiento de barrido puede ser efectuado por medios manuales o por equipos barredores (Bianchetto, 2017).

En zonas donde la calzada tenga pendientes excesivas es importante tomar los recaudos necesarios para evitar el escurrimiento del riego, lo cual puede dejar zonas descubiertas o con dotaciones deficientes.



Figura 2-2. Aplicación de un riego de liga
Fuente: revistazonalibre.com

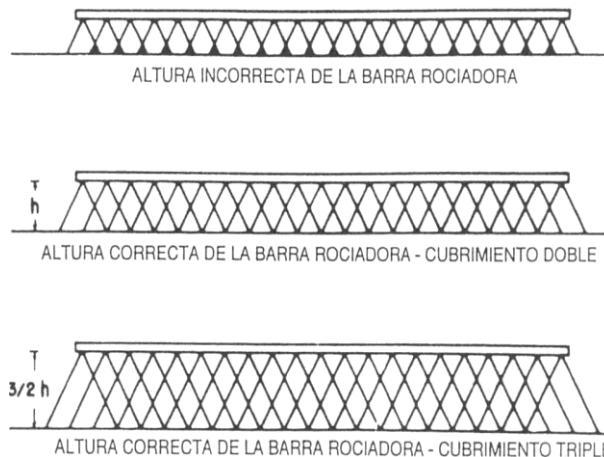


Figura 2-3. Esquema de distribución de un riego de liga
Fuente: Pajuelo Cubillas, 2008

Una vez aplicado un riego de liga se debe evitar el tránsito de vehículos sobre él y limitar al mínimo la circulación de las máquinas de obra. Las distintas especificaciones técnicas consultadas recomiendan que la colocación de la capa asfáltica de refuerzo sea efectuada el mismo día de aplicación del riego de liga. En el caso que condiciones extremas impidan este procedimiento, se recomienda en el momento previo a la colocación de la mezcla asfáltica de refuerzo regar nuevamente aquellas zonas que hayan quedado con defectos de riego (Ricci, 2011).

Como una observación adicional puede señalarse que es conveniente, en la distribución de espesores de la mezcla asfáltica entre la carpeta nueva y la capa ya existente, darle menor espesor a la carpeta nueva y mayor a la segunda, acercando el plano del riego de liga entre ambas capas al punto de aplicación de la carga (Giovanon y Buono, 2008).

Finalmente, cabe acotar lo establecido para vías de su jurisdicción por la Dirección Nacional de Vialidad de la Argentina (DNV) en su “Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas”, donde se estipula que la emulsión a utilizarse sea del tipo CRR-0 o CRR-1 (según la Norma IRAM 6691), con una dotación que arroje un resultado de al menos 0,7 MPa en el ensayo de adherencia entre capas de rodadura UNE-EN12697-48 (ensayo de corte sobre testigos, Leutner o de SBT, Figura 2-4) y que se ubique en el rango de 0,25 l/m² a 0,40 l/m² (DNV, 2017). Si bien esto es así, como se explicará más adelante, estos valores sólo deben tomarse a los efectos de la presente tesis como indicativos, pues al implementar una metodología de ensayo que incluye algunas adaptaciones relacionadas con los objetivos de la misma, las resistencias al corte esperables durante su ejecución no son directamente comparables a lo especificado.

2.2. El empleo del fresado en la rehabilitación

El Programa Estratégico de Investigaciones en Carreteras (*Strategic Highway Research Program - SHRP*), presentado en su versión original en 1993, posee una reciente segunda edición, denominada *SHRP-2 Solutions* (Bolzán, 2016). Esta nueva edición abarca cuatro áreas fundamentales: seguridad en las carreteras, renovación de pavimentos, confiabilidad en el tiempo de viaje y capacidad. El área de renovación de pavimentos se centra en la necesidad de acelerar la entrega de los proyectos de renovación con mínimas interrupciones al tránsito y las comunidades, al tiempo que se producen pavimentos de larga duración. Es decir, se establece la misión de renovar pavimentos en forma rápida y durable. Bajo este criterio, la condición principal del

SHRP-2 es la de incorporar la vieja estructura dentro de la nueva de renovación, con detalles de cómo y cuándo llevarla a cabo en forma rápida y durable. De esta forma, la renovación de pavimentos debe ser simple, pero no demasiado. Además, se debe tener en cuenta lo que ocurre en las capas inferiores. La calidad de la construcción resulta esencial en el proceso de renovación de los pavimentos, al igual que la unidad de funcionamiento, esto es que las capas tengan buena liga o adherencia (Bolzán, 2016), propiciando una reducción de las tensiones bajo la aplicación de la carga (Espinoza, 2015).



Figura 2-4. Máquina de ensayo de Leutner
Fuente: www.controls-group.com

Dado que el recrecido presenta el inconveniente de requerir espesores muy importantes de refuerzo, puede resultar conveniente fresar una o varias capas del pavimento, para a continuación reponer el espesor eliminado, antes de proceder a un recrecido que, lógicamente, sea de menor espesor que si no se hubiera fresado (Martínez-Echevarría, 2012; Peplow, 2006). En la Figura 2-5 se observa un pavimento fresado y la textura generada por el proceso.



Figura 2-5. Textura generada por el fresado del pavimento
Fuente: www.thetranstecgroup.com

El fresado previo al recrecimiento tiene, además, la gran ventaja de permitir rehabilitar de manera diferente zonas con distinto grado de deterioro; por ejemplo, los distintos carriles de una misma calzada de una autopista (Martínez-Echevarría, 2012). Además, permite suavizar las distorsiones de la superficie y establecer una base adecuada para la nueva capa a colocarse. Se recomienda mantener un mínimo de espesor en la

estructura existente dado potenciales errores en la evaluación del espesor de la capa que pueden llevar a gastos significativos; principalmente porque si queda muy poco espesor de pavimento que sirva como capacidad estructural, será necesario aumentar el grosor de la capa de refuerzo (Espinoza, 2015).

El origen del término fresado se remonta a la técnica de desbaste o corte de metales, u otras piezas, por intermedio de un engranaje constituido por un cortador giratorio de ángulos diversos, o de varios fresas, en movimiento giratorio continuo. Esa técnica da origen al término *milling machine*, aplicado a los equipos de fresado de parte de una estructura cualquiera. El equipo de fresado aplicable en los casos abordados, se concibe a partir de la segunda mitad de la década del '70, simultáneamente tanto en Europa como en América del Norte, como herramienta adecuada para posibilitar y garantizar el desbaste del pavimento en profundidades predeterminadas (Bonfim, 2008). De la simple observación de obras, cabe señalarse que esta técnica puede dar origen a diversos resultados de textura superficial, según se observa en la Figura 2-6 y la Figura 2-7.

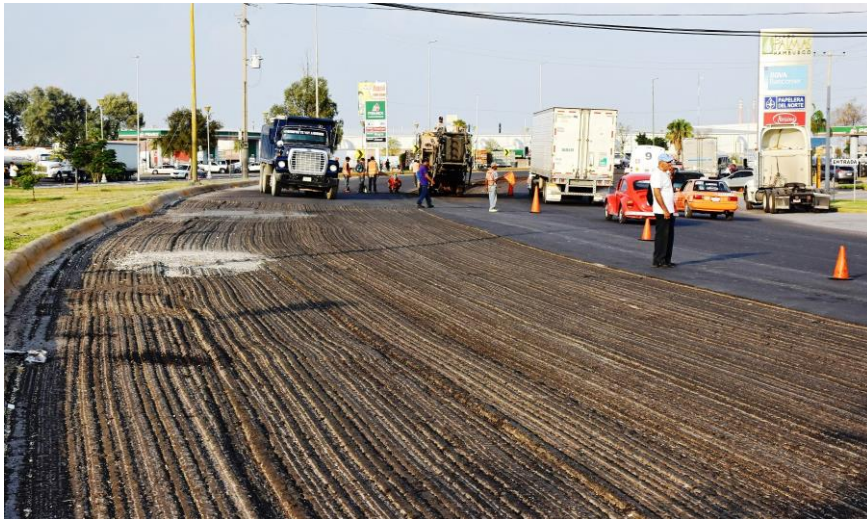


Figura 2-6. Obra con alta textura de fresado
Fuente: durangopress.com



Figura 2-7. Obra con baja textura de fresado
Fuente: durangopress.com

Esto se debe a que el fresado aplicado a la rehabilitación de pavimentos se origina de diversas maneras. En primer lugar, por el tipo de proceso específico utilizado se cuenta con: la *cold milling machine*, que efectúa el desbaste de la estructura por medio de un simple abrasivo; y el proceso en caliente, que utiliza el precalentamiento de la estructura para facilitar su desbaste. Así, el fresado del pavimento puede ser realizado de dos maneras con respecto a la temperatura, es decir, en frío o en caliente. En el fresado del pavimento en frío, el proceso es realizado a la temperatura ambiente, sin el precalentamiento del pavimento. El único tipo de calentamiento, a pesar de ser despreciable en el proceso, se refiere a la energía liberada por el impacto de los dientes de corte en el pavimento durante el fresado (Bonfim, 2008). La Figura 2-8 y la Figura 2-9 ilustran una superficie fresada en frío.

Las fresadoras en frío sirven para fresar superficies de asfalto y hormigón de forma rápida y eficiente, a la vez que crean una base llana y de acuerdo con el perfil para el extendido de pavimentos nuevos de espesor uniforme. La naturaleza de la superficie fresada influye en la calidad de los pavimentos nuevos y en las características de uso de los mismos, así como la realización económica de las otras obras de construcción. En el fresado en frío se hace una distinción entre el mantenimiento (obras de construcción menores con la finalidad de conservar el material), saneamiento (obras de construcción mayores con la finalidad de conservar el material y mejorar las características de la superficie) y renovación (reconstrucción completa) (Wirtgen, 2015).



Figura 2-8. Superficie fresada en frío
Fuente: Bonfim, 2008



Figura 2-9. Corte de una superficie fresada en frío
Fuente: Bonfim, 2008

En el fresado en caliente, en cambio, utilizado como parte del proceso de reciclaje in situ en caliente, se efectúa el precalentamiento del pavimento existente. En este caso, el fresado es similar, sin embargo se trata de una escarificación como forma de desbaste de la capa, pues ésta ofrece poca resistencia al corte por el hecho de que la

estructura está caliente (Bonfim, 2008). Dado lo citado, este tipo de fresado no es motivo de estudio en la presente tesis.

En cuanto al fresado en frío, varios autores divergen sobre su subclasificación de acuerdo a sus aplicaciones. No obstante, de manera resumida, se puede efectuar una distinción por el espesor de corte y la textura resultante en la vía. En función del espesor de corte se puede clasificar al fresado como: superficial, raso y profundo (Bonfim, 2008):

- Fresado superficial: también conocido como fresado de regularización, es destinado sólo a la corrección de defectos existentes en la superficie del pavimento. Con este tipo de fresado, puede ser dejado de lado el posterior recapado asfáltico de la vía, dado que la textura obtenida permite la circulación segura de los vehículos, aunque no muy comfortable; a excepción de puntos específicos donde la disgregación del revestimiento remanente acarree la formación de agujeros. Cabe observar que algunos de los equipos utilizados en las intervenciones para la mejora de las condiciones de la adherencia neumático-pavimento permiten el cambio del cilindro fresador por otro de mayor densidad de dientes de corte, lo cual posibilita generar superficies más confortables a la circulación. La mayoría de las operaciones de fresado mejoran la textura de la superficie de la vía (macrotextura) y de la superficie expuesta del agregado (microtextura), lo que favorece la resistencia al deslizamiento. De la misma forma, defectos del tipo de la exudación y la deformación plástica son tratados con el empleo de esta técnica para mejorar las condiciones de rodamiento.
- Fresado raso: alcanza normalmente las capas superiores del pavimento y presenta en la mayoría de los casos una profundidad promedio de corte de alrededor de 5 cm. Este procedimiento es usado en la corrección de defectos funcionales y en remiendos superficiales. Es aplicado, sobretodo, en vías donde se desea mantener los niveles del pavimento con respecto a los dispositivos de drenaje superficial y obras de arte adyacentes. La textura resultante del fresado aumenta la llamada resistencia al corte entre el antiguo pavimento y la nueva capa de rodamiento.
- Fresado profundo: es aquel en el cual el corte alcanza niveles considerables, lo que permite abarcar, además de la capa de rodamiento, las capas de unión, de base y hasta la sub-base del pavimento. Es un procedimiento generalmente utilizado en intervenciones basadas en el aspecto estructural, sea por recomposición de la estructura del pavimento, o incluso por reciclaje e incorporación de la capa de rodamiento a la base. Desde el punto de vista funcional, sobre todo en lo relacionado con la seguridad y el restablecimiento de las condiciones de actuación de los dispositivos de drenaje superficial, se utiliza esta técnica para corregir la pendiente original de las vías. También, es un procedimiento indicado en la ejecución de trabajos de pequeños remiendos y para recuadro de bacheos.

Como puede deducirse de lo expuesto, de acuerdo a esta clasificación del fresado en frío en función de la profundidad de corte, a los efectos de la rehabilitación de los pavimentos, resulta sólo de interés la tipología del fresado raso.

Por otro lado, la textura resultante en la vía depende del tipo de cilindro utilizado en la ejecución del fresado, además de la velocidad de operación. La evolución de los cilindros fresadores permite una mayor aplicabilidad de los equipos de fresado. En la actualidad existen en el mercado cilindros con diferente espaciado entre los dientes de corte. Esto da por resultado texturas de fresado en frío diferentes, que suelen clasificarse en tres categorías:

- Fresado estándar: introducido inicialmente en el mercado, se clasificó como fresado estándar al resultante del cilindro original de los equipos. La distancia lateral entre la posición de ataque de los dientes de corte en el pavimento es de aproximadamente 15 mm a 25 mm. Se utiliza este tipo de fresado para el desbaste de una capa superficial para la posterior aplicación de una nueva capa de rodamiento.
- Fresado fino: conocido en inglés como *fine milling*, fue introducido posteriormente al fresado estándar, como resultado de la aplicación de cilindros fresadores con la distancia lateral entre la posición de ataque de los dientes de corte de aproximadamente 8 mm a 15 mm, lo cual resulta en menores surcos y menor textura en la vía. Esta técnica es muy utilizada en la regularización horizontal de las vías, por posibilitar mejores condiciones de tránsito a los usuarios. En algunos casos, con este tipo de aplicación se puede eliminar el recapado asfáltico posterior de la vía.
- Microfresado: resulta del fresado con un cilindro provisto con dientes de corte posicionados lateralmente a una distancia de aproximadamente 2 mm a 3 mm. Consiste en la remoción de una capa muy delgada del revestimiento para la adecuación del perfil longitudinal o el retiro de tiras o franjas de señalización horizontal. En este tipo de fresado la aplicación posterior de una nueva capa de revestimiento es totalmente desechable.

Como puede deducirse, entonces, entran en el alcance de la presente tesis el fresado estándar y el fresado fino. La Figura 2-10, la Figura 2-11 y la Figura 2-12, muestran la comparación de los tipos de fresado según la textura resultante en la vía.

En la Figura 2-13 se observa otra forma de volcado de la distancia entre surcos; nótese la forma del perfil del surco manifestada en dicha figura.

Otras publicaciones vuelcan estos datos de la forma que se observa en la Figura 2-14 y la Tabla 2-1; nótese nuevamente aquí la forma del perfil del surco denunciada.

Por otro lado, las diferentes fuentes analizadas establecen rangos de profundidad de los surcos diferentes. En la Figura 2-15 se observa un ejemplo en tal sentido; nótese la forma del perfil del surco a la que se hace referencia.



Figura 2-10. Fresado estándar
Fuente: Bonfim, 2008



Figura 2-11. Fresado fino
Fuente: Bonfim, 2008



Figura 2-12. Microfresado
Fuente: Bonfim, 2008

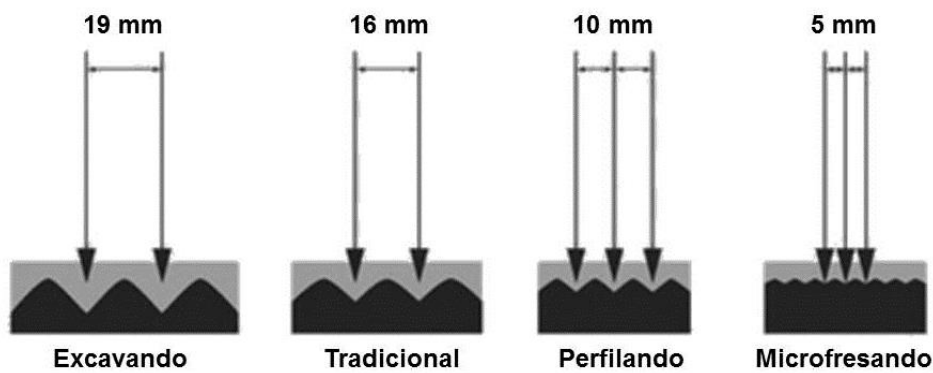


Figura 2-13. Ejemplo de información de distancia entre surcos del fresado
Fuente: www.forconstructionpros.com (traducción propia)

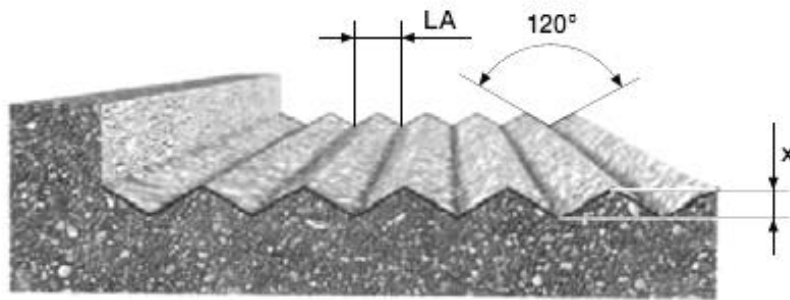


Figura 2-14. Ejemplo de perfil de surco relevado
Fuente: Wirtgen, 2013

Tabla 2-1. Datos para el perfil del surco
Fuente: Wirtgen, 2013 (traducción propia)

LA Distancia entre herramientas (mm)	X Ancho de base teórico (mm)	LA Distancia entre herramientas (mm)	X Ancho de base teórico (mm)
25	7,21	10	2,88
20	5,77	8	2,31
18	5,19	6	1,73
15	4,33	5	1,44
12	3,46	3	0,87

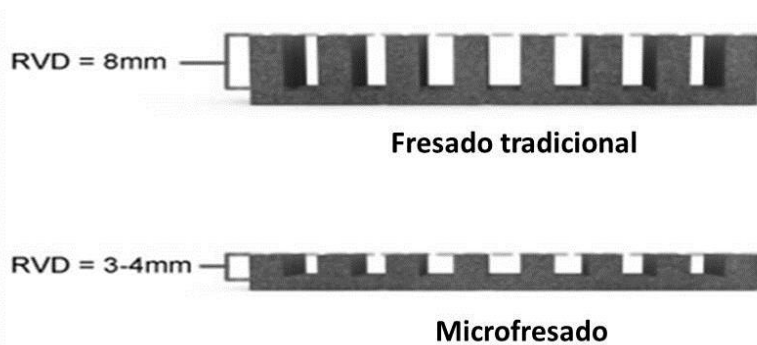


Figura 2-15. Ejemplo de información respecto de la profundidad de surco habitual
Fuente: Bussard, 2014 (traducción propia)

Al buscar límites que abarquen en su conjunto la información relevada, compuesta por el material volcado más otros de similares características, puede establecerse, entonces, que la profundidad de los surcos debería encontrarse entre 1 mm y 8 mm. Cabe aclarar que esta información también indica que existe una correspondencia entre la distancia entre surcos y su profundidad. Es decir, a distancias entre surcos cercanas al límite inferior, corresponden profundidades de los mismos también cercanas al límite inferior señalado; con una situación análoga entre aquellas distancias entre surcos cercanas al límite superior y sus respectivas profundidades.

Para resumir, se puede establecer en vista a los estudios presentados más adelante que, si se quisiera contar con una escala de seis casos patrones a ser considerados, los mismos podrían fijarse en los valores que se observan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Casos patrones de fresado a ser analizados
Fuente: elaboración propia

CASO	DIST. ENTRE SURCOS (mm)	PROF. FRESADO (mm)
1	8,0	1,0
2	11,4	2,4
3	14,8	3,8
4	18,2	5,2
5	21,6	6,6
6	25,0	8,0

En el Anexo A se han detallado particularidades de los equipos de fresado empleados en la amplia gama descripta y otras características de su aplicación.

2.2.1. Particularidades de las técnicas de fresado

Las técnicas de fresado posibilitan un gran número de aplicaciones y, a pesar de presentar ciertas semejanzas entre sí, son usadas de manera específica en cada una de las obras. Entre estas aplicaciones, se encuentra la del fresado para la corrección de los defectos superficiales, la cual se utiliza sobre defectos encontrados en la superficie de los pavimentos, más allá del fresado superficial (empleado en la corrección de deformaciones plásticas, exudaciones, etc.). Cuando esta técnica se aplica en sectores con deformaciones, se realiza lo que se conoce como la regularización de la vía. Para ello, se recurre al auxilio de una regla apoyada sobre el pavimento a fin de establecer las áreas de intervención (Figura 2-16). Para facilitar este trabajo son más indicados los equipos con cilindros fresadores anchos, y en lo posible con cilindro para fresado fino, lo cual disminuye la textura resultante en la vía. En ocasiones, el recapado sobre la superficie fresada puede ser eliminado.



Figura 2-16. Fresado de regulación de una vía
Fuente: Bonfim, 2008

La otra técnica de fresado relacionada con la rehabilitación de pavimentos es la del fresado continuo de toda la vía; la cual consiste en la ejecución del fresado en el ancho total de la vía, en un espesor de corte determinado. Tal procedimiento se usa en lugares en los que se desean mantener las pendientes longitudinales y transversales al efectuar el recapado asfáltico, solucionar problemas de pavimentos muy oxidados o que presentan gran desgaste superficial, atenuar los efectos de las ondulaciones o la propagación de fisuras del pavimento remanente a la nueva capa asfáltica, e inclusive eliminar otros defectos existentes en la capa de rodamiento asfáltica, como exudaciones y deformaciones plásticas. El fresado de toda la vía es

utilizado también para aliviar el peso sobre puentes y viaductos causado por recapados sin el retiro de las capas anteriores. En estos casos, corresponde emplear equipos de gran porte para disminuir el tiempo de intervención en la vía. En la Figura 2-17 se observa un esquema de la aplicación de la técnica en un pavimento entre cordones cunetas.

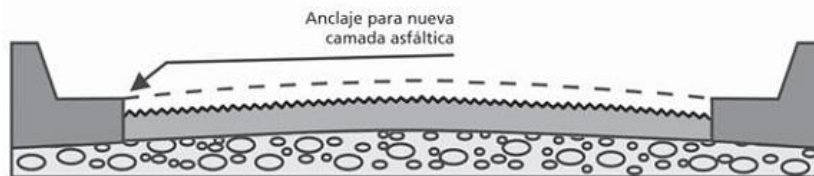


Figura 2-17. Aplicación del fresado continuo entre cordones cuneta
Fuente: Bonfim, 2008

2.2.2. La evaluación de pavimentos como condicionante del fresado

La evaluación de pavimentos es un conjunto de actividades que busca describir cuantitativa y/o cualitativamente la condición de un pavimento referente a los parámetros de comodidad y seguridad al rodaje, teniendo en vista los aspectos funcionales de la vía y su capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito.

Desde el punto de vista del usuario, varios son los factores que indican el deterioro de un pavimento (deterioro funcional). Para su análisis hay que tener en cuenta la subjetividad de la evaluación efectuada por el mismo, que considera generalmente sólo los defectos superficiales de la capa de rodamiento. De entre los factores que indican el deterioro funcional, se destacan las elevadas irregularidades longitudinales que llevan a la incomodidad del usuario, la baja textura del pavimento que acarrea la falta de adherencia del sistema neumático-pavimento, la presencia de baches en la superficie, el elevado nivel de fisuras con erosión de la capa de rodamiento, el ahuellamiento y las ondulaciones severas en la vía. Una simple observación visual puede indicar la condición en que el pavimento se encuentra desde el punto de vista funcional en lo que refiere a estas tipologías de defectos, exceptuándose defectos del tipo de la irregularidad, que resultan de más compleja percepción. Sin embargo, es muy importante conocer las probables causas de los defectos, además de los mecanismos de progresión del deterioro del pavimento. De esta forma, es posible seleccionar, entre las alternativas de rehabilitación, aquella que lleve a la eliminación o inhibición de la propagación del defecto, como recurso para prolongar la vida útil del pavimento (Bonfim, 2008).

El fresado del pavimento es la solución técnicamente viable para muchos de los deterioros observados en los pavimentos; sin embargo, en algunos casos no es adecuado para la solución de un problema en específico, dado en especial la causa del deterioro en particular (Peploe, 2006). Entre las numerosas publicaciones que abordan el tema de deterioros de pavimentos, se puede citar como ejemplo el *Distress Identification Manual for the Long Term Pavement Performance Studies* (SHRP, 1990), aunque existen varias publicaciones similares, que también pueden ser tomadas como de referencia. A continuación, se realiza una recopilación de las principales tipologías de deterioro identificadas en los pavimentos asfálticos factibles de ser resueltas mediante rehabilitaciones que conllevan el fresado de las capas superficiales, señalándose complementariamente aquellos aspectos de interés en cuanto a la aplicación de las técnicas de fresado en cada caso en particular:

- **Fisuras:** conocidas en inglés como *cracking*, son los defectos más encontrados en los pavimentos asfálticos. Existen de diversas tipologías, entre las que se encuentran las fisuras por fatiga, transversales, longitudinales, en bloques, por propagación de juntas y parabólicas. La primera etapa de las fisuras se inicia con la microfisuración del pavimento, lo que permite inicialmente evaluar el mecanismo de origen y la manera de propagación, para entonces decidir cómo solucionar el problema. En los casos en que el mecanismo de propagación de las fisuras se da desde la superficie del pavimento asfáltico hacia abajo, el fresado es una solución adecuada, pues facilita eliminar completamente el problema (Figura 2-18). En los casos en que el mecanismo de propagación de las fisuras se genera desde las fibras inferiores hacia las superficiales del pavimento, como es el caso de la conocida como “piel de cocodrilo” por fatiga, la utilización del fresado y el posterior recapado retardan la propagación de las fisuras, pero no resuelven definitivamente el problema. La fisuración parabólica es un ejemplo de deterioro que el fresado soluciona definitivamente, pues se trata de un defecto superficial originado por la poca resistencia de la mezcla asfáltica o por una inadecuada liga entre las capas subyacentes y la capa de rodamiento.



Figura 2-18. Fresado de pavimento con fisuras

Fuente: www.wirtgen.de

- **Deterioro de bacheos:** conocido en inglés como *patch deterioration*, es el conjunto de daños existentes en los lugares donde han sido ejecutados bacheos en el pavimento. El deterioro del bacheo puede ser ocasionado por su mala ejecución o por la envergadura de las sollicitaciones a las que están sujetas determinadas áreas o carriles. Si los defectos se deben a inconvenientes en la construcción o en la dosificación de la capa superficial, el fresado puede solucionar definitivamente el problema, pues posibilita el retiro de la capa defectuosa y la adecuada reconformación de la capa superficial. Si el problema es estructural, se debe evaluar si el fresado es o no una solución viable económicamente, sobre todo cuando involucra espesores importantes. En algunos casos, es dable pensar en la reconstrucción del pavimento. El reciclado, por ejemplo con incorporación de cemento, puede llevar a la homogeneización y la estabilización del material al incorporar la capa asfáltica superficial a la base, con la posterior aplicación de nuevas capas de rodamiento (Figura 2-19).
- **Baches:** conocidos en inglés como *potholes*, son defectos puntuales que corresponden generalmente a pequeñas áreas. Al principio, se manifiestan como la disgregación de ciertos componentes de la capa superficial por variadas causas, lo cual ante la no intervención lleva a la aceleración de la disgregación, originándose el bache. El empleo en estos casos de equipos de

fresado, más allá de la profundidad requerida para la rehabilitación, y en la profundidad necesaria para sanar el problema, es de fundamental importancia desde el punto de vista práctico y económico. Esto se debe a que la aplicación del fresado posibilita el recuadro de los lugares donde existen baches, lo que ofrece una condición adecuada para el anclaje de las capas de reconstrucción.



Figura 2-19. Reciclado de un pavimento
Fuente: www.britishlime.org

- Ahuellamiento: conocido en inglés como *rutting*, es una depresión que ocurre a lo largo de la vía, con la consecuente elevación lateral de la capa asfáltica (Figura 2-20). Este defecto puede tener su origen en el empleo de una mezcla asfáltica inadecuada para las condiciones del lugar y/o por deficiencia estructural de las capas inferiores del pavimento. En el primer caso, el fresado es indicado para la corrección del defecto, pudiéndose remover completamente la capa comprometida y así posibilitar la colocación de una nueva capa con mezcla apropiada. En el segundo caso, generalmente caracterizado por hundimientos de huella con alto nivel de severidad, la rehabilitación mediante el empleo del fresado superficial no resulta la solución técnica más indicada. Por lo tanto, se debe proceder generalmente a la demolición de parte o de todo el pavimento.
- Hundimientos: conocidos en inglés como *depression*, son concavidades que aparecen en los pavimentos, relacionadas a defectos constructivos u originadas por el hundimiento de la estructura del pavimento en determinados lugares. Los hundimientos de orden constructivo en la capa de revestimiento pueden ser eliminados con el fresado de espesores delgados y el posterior recapado asfáltico. En los casos de hundimientos o deformaciones de las capas inferiores, al igual que en los casos anteriores, la rehabilitación mediante el empleo del fresado superficial no resulta la solución técnica más indicada. Por consiguiente, se debe proceder generalmente a la demolición de parte o de todo el pavimento.
- Deformación plástica: conocida en inglés como *shoving*, son defectos funcionales encontrados en la superficie de los pavimentos, provenientes sobre todo de la aplicación de una mezcla asfáltica inadecuada, por lo cual se agrava el problema con la superposición de otras capas de revestimiento sin la remoción de la capa existente. Algunas mezclas con ligante de fluidez elevada, exceso de ligante y expuestas a altas temperaturas, no soportan las cargas del

tránsito y se deforman con la acción de éste. El fresado de la capa superficial es una técnica adecuada, pues permite la remoción del espesor del pavimento que presenta el problema y la colocación de la nueva capa de rodamiento.



Figura 2-20. Pavimento ahuellado por inadecuada mezcla asfáltica
Fuente: www.pavementinteractive.org

- Ampollas: conocidas en inglés como *blisters* (Bianchetto, 2012), constituyen levantamientos aislados y reiterados en el pavimento, que conforman domos o montículos de diámetro variable (hasta unos 25 cm), con fisuras entrelazadas de flexión que comienzan en la parte externa del casquete y que progresan hacia el interior de la capa bituminosa de rodamiento. Son producidas por presión de vapor o aire en zonas de la capa de rodadura impermeable o débil en espesor o consistencia, dada por lentes de agua o hielo interpuestas entre las capas superpuestas del pavimento. El fresado de la capa superior, el secado de la superficie y la colocación de una nueva capa superficial permiten solucionar el defecto. En la Figura 2-21 se observan imágenes de dicho tipo de deterioro.
- Agregados pulidos: conocidos en inglés como *polished aggregates*, son defectos funcionales producidos por el desgaste de las aristas de los agregados expuestos en la superficie del pavimento por la acción del tránsito, produciéndose la disminución del coeficiente de fricción y el perjuicio de la adherencia entre el neumático y el pavimento. Estos defectos pueden ocurrir debido a que el tipo de agregado utilizado en la confección de la mezcla asfáltica no resiste la acción del tránsito intenso. El fresado superficial puede ser utilizado para proporcionar una buena adherencia entre el neumático y el pavimento y mejorar las condiciones de resistencia al deslizamiento. Sin embargo, el problema puede volver después de algún tiempo de exposición al tránsito. Por lo señalado, es adecuado emplear rehabilitaciones con capas de bajo espesor para subsanar el defecto.
- Exudación: conocida en inglés como *bleeding flushing*, es resultante del afloramiento del material asfáltico en la superficie del pavimento, debido a un exceso de ligante en la mezcla asfáltica superficial, transformándose así, con el transcurso del tiempo, en una película que deja lisa la superficie. El proceso de exudación es irreversible, pues no existe manera de retirar el exceso de ligante de la mezcla asfáltica. La exudación de la masa asfáltica acarrea una reducción de la adherencia entre el neumático y el pavimento, situación que se

agrava con el pavimento mojado. Se trata de un defecto funcional, que puede ser tratado mediante el retiro de todo el espesor del revestimiento que presente exceso de ligante, seguido del posterior recapado con una mezcla asfáltica adecuada. En la Figura 2-22 se observa una imagen de este tipo de deterioro.



Figura 2-21. Deterioro de la capa superficial por ampollas
Fuente: Bianchetto, 2012



Figura 2-22. Superficie con exudación
Fuente: Bianchetto, 2012

- Desintegración del pavimento: entre los defectos que abarca se encuentra la desintegración por cargas (*ravelling*), la desintegración por intemperie (*weathering*) y el desprendimiento (*stripping*). Estos defectos se caracterizan por el deterioro del pavimento a causa de la pérdida progresiva de partículas de agregado, por la pérdida del ligante o por la pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto. El fresado puede solucionar el problema, ya sea que se aplique superficialmente o alcance grandes espesores de corte.
- Bombeo de finos: conocido en inglés como *pumping*, es un defecto ocasionado por la carga ejercida por el tránsito y se constata por la presencia del material granular de las capas subyacentes en la superficie del pavimento; movilizado por las fisuras existentes en el pavimento. Este defecto es común cuando el pavimento se encuentra muy fisurado, con infiltración de agua que llega hasta las bases granulares. De esta forma, debido al drenaje muy lento del agua en estas capas, permanece en el interior del pavimento, generándose con la presión ejercida por los neumáticos su bombeo hacia la superficie a través de las fisuras, con la carga de partículas finas de material de la capa granular y con el consecuente colapso de la estructura del pavimento en poco tiempo. El fresado y el recapado inhiben la entrada de gran cantidad de agua en el

pavimento, pero las fisuras tienden a propagarse y el defecto vuelve al corto plazo, razón por la cual la reconstrucción es la técnica más adecuada.

- **Superposición excesiva de capas asfálticas:** puede ser considerada un defecto a partir del momento en que provoque en la vía una condición indeseada a la seguridad y al tránsito (Peploe, 2006). El fresado de un determinado espesor del revestimiento definido en un proyecto permite la remoción del material degradado para la colocación de una nueva capa de rodamiento, sin modificar las cotas del pavimento, con la relativa mejoría estructural y funcional. Los problemas estéticos son aquellos observados cuando las cotas de la superficie de rodamiento en los bordes llegan a ser superiores a la cota de las aceras en zonas urbanas. Los problemas funcionales, en cambio, se dan por la modificación de la sección transversal de escurrimiento, lo que ocasiona la inundación de los desagües, la deformación de las sucesivas capas de rodamiento sobre las cunetas y la disminución de la capacidad de las mismas. Otro importante problema, también funcional, se da por la disminución de la altura bajo puentes, viaductos y dentro de túneles. La alteración de la sección transversal del pavimento causa, también, problemas de seguridad, debido a la inclinación excesiva de la vía, además del hecho de que los usuarios quedan expuestos a sufrir accidentes derivados de la disminución de la altura de los cordones laterales, cuya finalidad es delimitar justamente la acera (Bonfim, 2008). La Figura 2-23 presenta un pavimento donde se han ejecutado sucesivos recapados asfálticos sin la remoción de las capas superficiales existentes, con la cota del borde de la calzada aproximadamente 30 cm por encima de la acera.

Adicionalmente, cabe señalar que es común que en sectores donde se ha aplicado un fresado se obtenga como resultado una superficie descascarada, en la cual la capa asfáltica remanente se “salta” de la superficie (Muench y Moomaw, 2008), como se observa en la Figura 2-24. Para evitar este problema, se debe conocer la estructura del pavimento y definir en el proyecto el espesor de fresado. Se recomienda evitar dejar un espesor remanente muy delgado de capa asfáltica, inferior a 20 mm, para evitar el problema citado. Cuando no sea posible mantener este espesor mínimo remanente, es conveniente ejecutar la nueva capa asfáltica inmediatamente después del fresado, de manera de preservar toda la estructura remanente.



Figura 2-23. Superposición de capas sin remoción
Fuente: Bonfim, 2008



Figura 2-24. Descascaramiento por bajo espesor remanente
Fuente: Bonfim, 2008

Referencias

AASHTO, "Guide for design of pavement structures 1993", American Association of State Highway and Transportation Officials, ISBN 1-56051-055-2, EEUU, 1993.

BIANCHETTO, H., "Presentación de dos casos de patologías no habituales en pavimentos asfálticos: diagnóstico, solución y propuesta de medidas preventivas", T-058, XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (ISBN 978-987-28682-0-8), Córdoba, Argentina, 2012.

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

BOLZAN, P., "SHRP-2 Renovación de pavimentos", Revista Vial, ISSN 0329-1146, noviembre-diciembre, n° 112, pp 44-49, Argentina, 2016.

BONFIM, V., "Fresado de pavimentos asfálticos", Editorial Exceção, primera edición, Brasil, 2008.

BUSSARD, M., "Milling & Micro Milling", P.R. Systems Inc., EE UU, 2014.

CAMPANA, J.M., ROZADA PERET, B., "Consideración de la adherencia entre capas asfálticas en el análisis estructural", XXXIV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Mendoza, Argentina, 2004.

DNV, "Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas", Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_8.pdf]

EICAM, "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93", Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.

ESPINOZA, M., "Capas de refuerzo con hormigón adheridas como alternativa para la rehabilitación de pavimentos asfálticos", Revista Infraestructura Vial (ISSN 1409-4045), Universidad de Costa Rica, volumen 17, número 30, diciembre, Costa Rica, 2015.

GIOVANON, O., BUONO, F., "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.

HUANG, Y.H., "Pavement analysis and design", Second Edition, University of Kentucky, Pearson Prentice (ISBN 0-13-142473-4), EEUU, 2004.

IRAM, "Norma IRAM 45.001: Adhesivos, definiciones", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1998.

MARONI, L.G., "El uso de geotextiles en pavimentación asfáltica, una experiencia reciente", Revista Carreteras (ISSN 0325-2096), año XXXVIII, n 140, pp 57-66, Argentina, 1993.

MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M.J., "Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012.

MILLER, J., BELLINGER, W., "Distress identification manual for the long-term pavement performance program", fourth revised edition. Report No. FHWA-RD-03-031, Washington DC, EEUU, 2003.

MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F., TEORO CARMO, C.A., "Avaliação da aderência de geogrelhas entre camadas asfálticas", Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.

MUENCH, S.T., MOOMAW, T., "De-Bonding of Hot Mix Asphalt Pavements in Washington State: An Initial Investigation", TNW 2008-10, Transportation Northwest (TransNow), University of Washington, EEUU, 2008.

NCHRP, "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures", National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.

PAJUELO CUBILLAS, C.F., "Importancia de la imprimación asfáltica en carreteras", CRV5 Consorcio Constructor, Perú, 2008.

PEPLOE, R., "Applications for asphalts millings on New Zealand", Land Transport New Zealand Research Report 298 (ISBN 0-478-28710-0), Bartley Consultants Ltd, 96 pp, Nueva Zelanda, 2006.

RECASENS, R., “Riegos de adherencia. Materiales y ensayos de control”, apunte de cátedra, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2009.

RICCI, L.A., “Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético”, Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.

SILFWERBRAND, H., BEUSHAUSEN, H., COURARD, L., “Bonded cement-base material overlays for the repair, the lining or strengthening of slabs or pavements”, RILEM State of the Arts Reports, Springer Netherlands, 3 (1), 51-79, doi: 10.1007/978-94-007-1239-3, Holanda, 2011.

VASALLO MAGRO, J.M., “Evaluación de los sobrecostos del transporte por carretera en España debidos a una insuficiente conservación”, Revista Carreteras (ISSN 0212-6389), vol. 116, pp 19-31, España, 2001.

WHITE, G., “Asphalt overlay bond strength”, Australian Airports Association, Aircraft Pavement and Lighting Conference, Australia, 2015.

WIRTGEN, “El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen”, Wirtgen Group Company, Alemania, 2015.

WIRTGEN, “Wirtgen cold milling manual. Technology and application”, Wirtgen GmbH, Alemania, 2013.

YAACOB, H., HAININ, M.R., SAFUAN, A., CHANG, F.L., “Information for the malaysian asphalt industry towards better pavement interlayer bonding”, Sains Malaysian, n 43, vol 3, pp 467-474, Malasia, 2014.

YODER, E.J., WITCZAK, M.W., “Principles of pavements design”, John Wiley & Sons Inc., Second Edition, EEUU, 1975.

3. ANÁLISIS DE LAS INTERFASES EN LAS REHABILITACIONES

3.1. Las interfases en los paquetes multicapas

Si una viga simplemente apoyada estuviera formada por varias capas de espesor delgado, colocadas simplemente apoyadas unas sobre otras, sería menos resistente a la flexión que una viga monolítica de igual altura total, o la misma viga de delgadas capas, pero adheridas fehacientemente entre ellas. Esto puede demostrarse con la teoría básica de la flexión, Ecuación 3-1, que dice que la tensión debida a flexión en cualquier sección es directamente proporcional a la relación entre el momento flector y su módulo resistente. Como este último es directamente proporcional al cuadrado de la altura en una sección rectangular, se evidencia la importancia de poseer espesores de capa considerables y netamente adheridos entre sí.

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{bh^2}{6}} \quad (3-1)$$

Donde:

- σ_{\max} = esfuerzo a la flexión máximo [kg/cm²]
- M = momento flector aplicado [kg.cm]
- W = módulo resistente de la sección rectangular [cm³]
- b = ancho de la sección rectangular [cm]
- h = altura de la sección rectangular [cm]

En una viga sometida a la flexión simple, los esfuerzos presentados en una de sus secciones son los representados en la Figura 3-1. Se aprecia que la mitad superior de la sección está sometida a esfuerzos de compresión y la inferior a tracción. Por la condición de equilibrio de fuerzas en el eje X en toda la sección, las fuerzas de compresión quedan equilibradas con las de tracción. Ahora bien, si se analizase sólo una de las láminas de la sección, por ejemplo la delimitada por *abcd*, el esfuerzo de compresión resultante en la misma sólo sería equilibrado por un esfuerzo cortante y de sentido opuesto a la compresión, desarrollado en el plano *dce*. Este esfuerzo cortante se ve materializado por la adherencia en los sistemas multicapas, y de allí su importancia. Como la fuerza de compresión total aumenta hasta el eje neutro, allí se requiere una resistencia de adherencia de mayor valor para contrarrestar su efecto (Pytel y Singer, 2004).

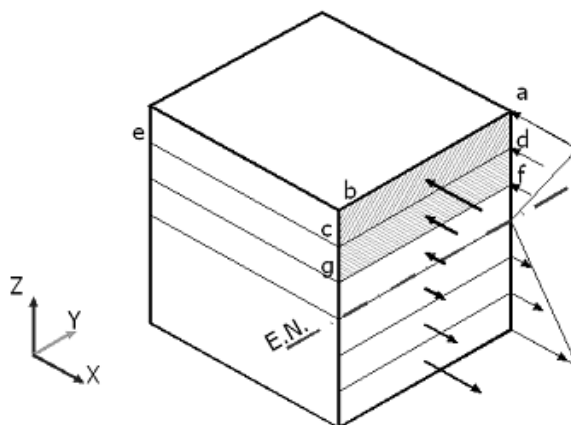


Figura 3-1. Esfuerzos en una viga a flexión
Fuente: Ricci, 2011

En capas intermedias, la rigidez al cizallamiento en la interfase decrece (De Bondt, 1999). En la Figura 3-2 se muestra un esquema de dos vigas simplemente apoyadas, en la situación A se tiene una viga monolítica y en la situación B dos vigas superpuestas.

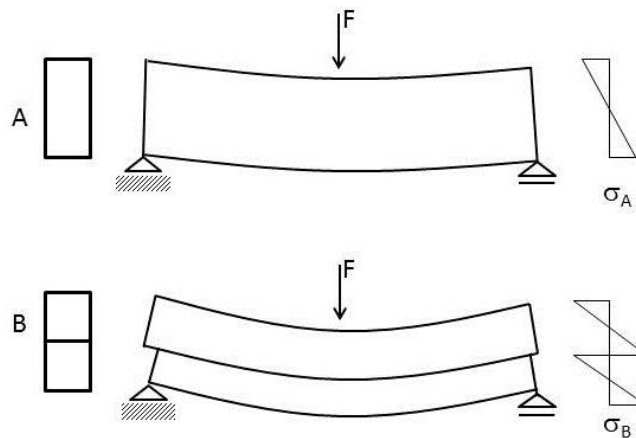


Figura 3-2. Esquema de tensiones en una interfase
Fuente: De Bondt, 1999

La tensión de tracción en la situación A, por tener una misma curvatura en la parte superior y en la inferior, se puede escribir como en la Ecuación 3-2.

$$\sigma_A = \frac{3}{2} \cdot \frac{Fl}{h^2} \quad (3-2)$$

Donde:

F = fuerza aplicada [kg]

Para la situación B, en cambio, la tensión de tracción es la que define la Ecuación 3-3.

$$\sigma_B = 3 \cdot \frac{Fl}{h^2} \quad (3-3)$$

Como se puede observar, para un mismo valor de F la tensión generada en la situación A es la mitad de la generada en la situación B. Se puede concluir que, debido a la falta de adherencia, en la situación B (De Bondt, 1999):

- La deflexión en el centro de la viga aumenta
- La distribución de tensiones se modifica drásticamente
- La tensión de tracción en la interfase se incrementa

Los pavimentos compuestos por diversas capas asfálticas son un ejemplo particular de todo lo expuesto, pues en su materialización se generan interfases que pueden afectar el comportamiento monolítico del espesor total. La existencia de un riego de liga en la interfase (también llamado riego de adherencia), dada la discontinuidad generada, da origen a una situación que merece un análisis en tal sentido, pues generalmente el diseño estructural de los pavimentos flexibles considera que el conjunto de capas actúa en forma solidaria frente a las cargas de tránsito. La falta de adherencia entre capas genera una reducción en la vida útil de los pavimentos y la presencia de fallas prematuras, por cuanto la estructura se ve limitada a las capas superiores no adheridas, con consecuencias económicas considerables. Por esto, el

sistema de capas superpuestas debe actuar solidariamente, pues la relación íntima que tienen sus componentes lleva a que su comportamiento satisfactorio no sea sólo derivado del comportamiento individual de cada parte constituyente, sino también de esta relación (Ricci, 2011).

El mecanismo que contribuye a la resistencia al corte en la interfase es complejo e interactivo. Como muchos fenómenos de la ingeniería, en servicio la adherencia es difícil de medir u observar sin impactar en el proceso. También es difícil aislar los variados componentes que contribuyen a la adherencia total entre las capas asfálticas involucradas. Como resultado de esto, existen aún zonas de grises en el conocimiento relacionado y diferentes opiniones respecto de cómo cada componente contribuye a la adherencia entre capas, tanto como de los mecanismos asociados con las fallas por despegue (White, 2015).

En 1978, Uzan et al. describieron a la adherencia en la interfase como una combinación de la adhesión, fricción y el intertrabado mecánico. Además, expresaron que existe una relación lineal entre la resistencia a la adherencia y la carga normal aplicada. En 2005, Canestrari y Santagata describieron el esfuerzo involucrado en la interfase como de cohesión, dilatación (propiedad de los materiales que describe el incremento en volumen de un material frente a un esfuerzo de corte) y fricción, como se muestra en la Figura 3-3.

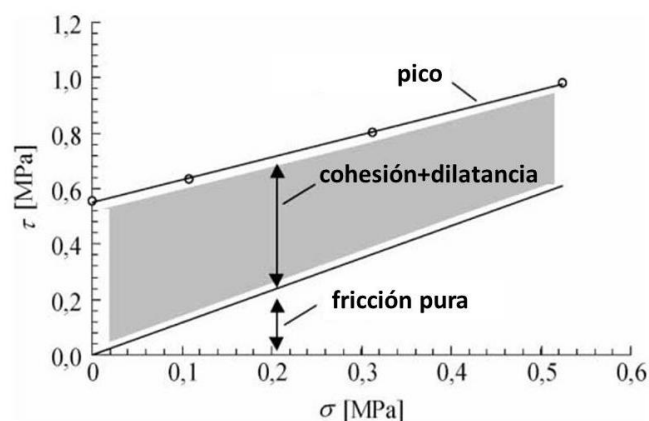


Figura 3-3. Esfuerzo de corte (τ) vs. esfuerzo normal (σ)
Fuente: White, 2015 (traducción propia)

Canestrari y Santagata también analizaron que el elemento de fricción puede ser aislado, si se confeccionan muestras que sean compactadas por separado y se colocan juntas sin el riego de liga. Sin embargo, la compactación por separado debería también minimizar la cantidad de agregado implicada en el intertrabado, con su correspondiente contribución al esfuerzo de corte. La omisión de la capa de liga debería minimizar la influencia de la adhesión. Es de esperarse que exista dificultad para ensayar estas muestras, pues sólo sería necesario vencer la fuerza que mantiene las dos capas en contacto (White, 2015).

La relación entre el esfuerzo en la interfase y la carga normal aplicada ha sido comúnmente expresada como una adaptación del modelo de Mohr-Coulomb. Esta adaptación, propuesta por Uzan en 1978, ha sido confirmada por muchos otros autores (White, 2015). La forma general del modelo de Mohr para el esfuerzo en la interfase se observa en la Ecuación 3-4.

$$\sigma = c + N \cdot \tan \emptyset \quad (3-4)$$

Donde:

- σ = esfuerzo de corte en la interfase
- c = adhesión en la interfase provista por la capa de liga
- N = esfuerzo normal aplicado
- \emptyset = ángulo de fricción

En 2009, Horak et al. establecieron que la interacción entre los neumáticos de un vehículo y la superficie del pavimento es compleja, lo cual es ratificado en 2011 por Al-Qadi y Wang, cuando manifiestan que a pesar de los significativos esfuerzos realizados en investigación en este área, todavía no existe un método rutinario para cuantificar exactamente los esfuerzos dados por el contacto de los neumáticos en el diseño de pavimentos. Generalmente se considera que los mecanismos y fuerzas que actúan en un pavimento por el paso de un neumático incluyen las fuerzas normales y de corte, según la descripción gráfica realizada en 2004 por Raab y Partl, Figura 3-4. Mientras tanto, ya en 2006, Yoo et al. explican que las fuerzas de corte se presentan bajo neumáticos que giran libremente, pero se incrementan significativamente durante las operaciones de frenado y giro (White, 2015).

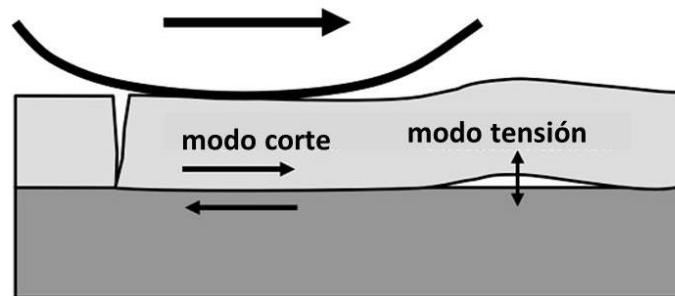


Figura 3-4. Esfuerzos en una capa superficial por el paso de un neumático
Fuente: Raab y Partl, 2004 (traducción propia)

Al utilizar la modelación por elementos finitos, el equipo liderado por Su (2008) concluyó que la máxima fuerza de corte se da alrededor de 60 mm por debajo de la superficie de rodamiento. En contraste, el grupo de análisis de Uzan (1978) sugirió que el pico del esfuerzo de corte debería ocurrir aproximadamente en la mitad del espesor de la capa superficial y el de Horak (2009) determinó por análisis de capas elásticas que ese pico se produce en la superficie y que se reduce rápidamente con la profundidad. Independientemente de la ubicación y magnitud del pico de esfuerzo, según los trabajos de Mohammad et al. (2009), es claro que cuando una interfase no puede resistir los esfuerzos aplicados falla y el despegue ocurre. Esta falla en la interfase de las capas puede ocurrir por una única carga excesiva, sin embargo es más común que suceda bajo fatiga por cargas cíclicas, según se expresa en los estudios liderados por Hakimzadeh (2012).

Como se expresara, el análisis de la distribución de los esfuerzos de corte en la interfase del riego de liga puede efectuarse al aplicar la técnica de los elementos finitos. Esto se realiza mediante el desarrollo de una rutina de mallado, para definir diferentes paquetes estructurales bajo la carga de un eje de vehículo, y con la consideración de que las capas se encuentran correctamente adheridas. De esta manera, algunos autores obtuvieron las tensiones de corte que debe resistir el riego de liga para garantizar la adherencia entre capas. De la distribución de esfuerzos de corte en la interfase, analizada mediante esta vía, Giovanon y Buono (2008) pudieron observar que los esfuerzos de corte son sensiblemente mayores en las estructuras

con carpeta asfáltica y base granular, con respecto a las estructuras con carpeta y base asfáltica. A su vez observaron que los mayores esfuerzos de corte se dieron para los espesores más delgados de carpeta. Además, obtuvieron gráficas de esfuerzos de corte sobre el riego de liga, en las cuales establecieron que los valores que se alcanzan cuando transitan vehículos pesados sobre una estructura de pavimento oscilan entre 0,3 MPa y 0,8 MPa.

3.1.1. La incidencia en el modelado estructural de pavimentos

La consideración estructural de la interfase que se realice en un caso en particular, está condicionada al modelo estructural de análisis que se emplee, pues puede ser abordada desde diversos puntos de vista (EICAM, 1998; Uzan et al., 1978).

Los pavimentos flexibles son dimensionados con una vida útil preestablecida con relación a la fatiga de los materiales asfálticos. Las propiedades iniciales de estos materiales de plasticidad y elasticidad se alteran con el tiempo, por ello se vuelven rígidos y quebradizos. Además, se observa que algunos factores externos aceleran su deterioro, por ejemplo: el drenaje deficiente (y hasta la falta de éste) y la sobrecarga (Bonfim, 2008).

Genéricamente, en los pavimentos flexibles multicapas, particularmente abordados en esta tesis, las solicitaciones del tránsito introducen tensiones importantes en la estructura. Éstas son absorbidas por el conjunto de las distintas capas que los componen. Las tensiones generadas por la acción del tránsito son introducidas en la estructura a través de la capa de rodamiento y transmitidas, a través de ésta, hacia las capas inferiores de la estructura y la subrasante (Giovanon y Buono, 2008; Yaacob et al., 2014).

El comportamiento de la estructura es el resultado del comportamiento de cada uno de los materiales actuando en conjunto, bajo la acción del tránsito y el clima (Giovanon y Pagola, 2012). Las mejoras en los procesos de análisis, que incluyen un adecuado modelado de la interfase, llevan a reducir los costos de mantenimiento y rehabilitación (Romanoschi, 1999). Por esto, es necesario estudiar el modelado del paquete estructural reforzado y analizar, de ser posible, la incidencia del fresado. Para ello se deben abarcar los rangos de profundidad de surcos y separación de los mismos, que presentan físicamente diferencias en la constitución de la interfase (Brown y Brunton, 1984).

Complementariamente, como comentario general que se profundizará más adelante, cabe señalar que incluso las más modernas metodologías de análisis mecánico-empíricas, parten de estudios que se han encarado para materiales típicos de la zona de intervención de las agencias viales que les dan origen. Por lo expresado, se recalca en todos los casos la necesidad de calibrar y validar los modelos de deterioro a los condicionantes y materiales locales (NCHRP, 2004; Giovanon y Pagola, 2012). Esto es así, aún cuando estas metodologías han avanzado en emplear definiciones de las categorías funcionales de las vías (Giovanon y Pagola, 2012; Yoder y Witczak, 1975), relacionables con las propiedades de rugosidad superficial, resistencia friccional del pavimento asfáltico a ser reforzado, y con la respuesta estructural de la interfase ante diferentes temperaturas y frecuencias de carga (Zornberg, 2015).

3.1.2. La textura en la interfase

La textura tiene un rol importante en la mayoría de los fenómenos físicos. En el campo de los pavimentos viales, la textura de la superficie de una capa incide en el comportamiento de la interfase con otra capa superpuesta, por lo que influye en la

resistencia a la adherencia a los esfuerzos de corte causados por las cargas verticales aplicadas por las ruedas en movimiento y, en ocasiones, las maniobras de frenado, aceleración y giro (D'Andrea et al., 2013).

La importancia de la textura de la interfase entre capas de pavimento y la influencia negativa de la pérdida de adherencia en el comportamiento de la infraestructura, han sido recién entendidas a principios de la década de 1970. Los primeros logros de la mayoría de los investigadores fueron el diseño y el desarrollo de nuevas metodologías de ensayo, capaces de caracterizar in situ o en laboratorio el comportamiento al esfuerzo de corte de interfases con diferentes texturas y tratamientos. Diversos procedimientos y ensayos existen en tal sentido, pero la usual ausencia de normas en esos procedimientos permite la difusión de nuevos prototipos, típicamente usados para mejorar las investigaciones de diferentes factores que afectan el esfuerzo de corte en la interfase. La comparación entre los dispositivos propuestos ha demostrado que los ensayos de corte son un buen y efectivo método para analizar la adherencia en interfases de pavimentos asfálticos (D'Andrea et al., 2013).

Por medio de estas técnicas de ensayo, Sholar et al. (2004) han encontrado que las mezclas asfálticas en caliente con granulometrías gruesas soportan mayor esfuerzo de corte, comparado con mezclas con granulometrías finas. También han encontrado que en secciones fresadas, al utilizar un riego de liga, el incremento de la resistencia al corte en la interfase no fue notorio. D'Andrea y Tozzo (2013) han confeccionado probetas asfálticas dobles, donde la superficie de la base fue tratada de diferentes maneras para dotarla de mayor textura. Al analizar estas probetas mediante el ensayo de la interfase al esfuerzo de corte, han determinado una correlación entre el esfuerzo de corte en la interfase y las características de la superficie. En cambio, West et al. (2005), al analizar los resultados de probetas confeccionadas en laboratorio y mediante ensayos en campo, probaron más alta adherencia en mezclas finamente graduadas que en mezclas gruesas. La significativa interacción del tipo de mezcla con otras variables (por ejemplo la dotación del riego de liga, los materiales utilizados, la temperatura de ensayo, etc.) fueron también evaluadas con tendencias contradictorias en algunos casos (D'Andrea et al., 2013).

Estudios recientes efectuados en China, en los cuales se emplearon diversos materiales como riego de liga, han demostrado en todos los casos incrementos en la resistencia al corte cuando se analizan interfases que han registrado fresado, respecto de aquéllas donde no se ha registrado fresado (Zhang et al., 2016). En la Figura 3-5 se observa un ejemplo en tal sentido, donde se comparan cuatro materiales distintos empleados como riego de liga.

En líneas generales, entonces, se ha podido determinar que sistemas de refuerzos en los que se aplican tratamientos que llevan a incrementar la textura de la capa de base asfáltica, en comparación con el "no tratamiento" de esa capa, muestran parámetros de resistencia al corte más fuerte cuanto más altos son los picos de la textura, posiblemente debido a un mejor intertrabado entre las capas (D'Andrea et al., 2013; Muench y Moomaw, 2008), pero no en forma definitiva. Lo expresado ratifica la necesidad de profundizar los análisis, máxime para el empleo de materiales locales y la tipología en particular de refuerzo con mezcla asfáltica en caliente.

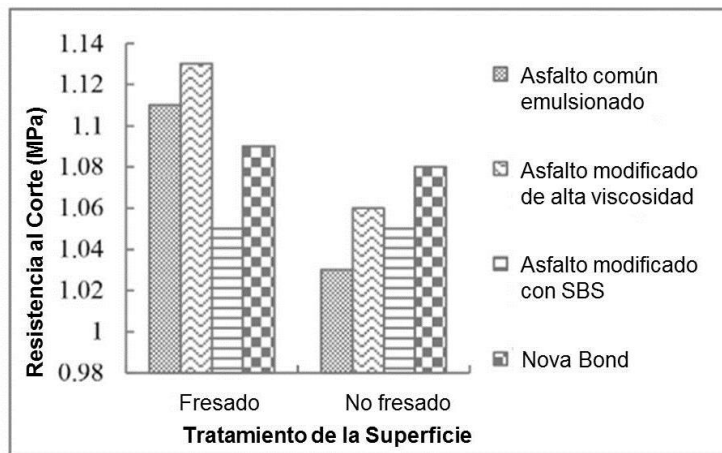


Figura 3-5. Resistencia al corte para diversos materiales en un riego de liga
Fuente: Zhang et al., 2016 (traducción propia)

3.2. Los modelos estructurales de pavimentos

Los modelos de comportamiento estructural se utilizan para el diseño y verificación de los pavimentos. Se suelen encontrar formando parte de los sistemas de gestión vial comúnmente utilizados en las reparticiones relacionadas con la temática. Son una herramienta muy útil para estas administraciones públicas y empresas concesionarias, pues permiten realizar una mejor programación de sus inversiones y definir el momento más apropiado para la realización de las tareas de mantenimiento. Además, colaboran en el sustento de una adecuada calidad de servicio del pavimento y en el logro de un mayor beneficio económico (Giovanon y Pagola, 2012). Sin embargo, como consecuencia de diferentes aspectos, el desarrollo de modelos de comportamiento de las estructuras viales resulta complejo. Entre dichos aspectos se pueden citar:

- Los materiales asfálticos resultan susceptibles a condiciones de frecuencia de carga y temperatura (como variables principales).
- Los suelos y materiales granulares son susceptibles al nivel de tensiones y contenido de humedad (como variables principales).
- Cada una de las capas constitutivas del pavimento se encuentran, en general, constituidas por un conglomerado de diferentes materiales.
- El entorno climático variable condiciona tanto mediante la temperatura como mediante el contenido de humedad.
- Las fallas estructurales se producen por fatiga y son el resultado de la reiteración de las cargas variables en intensidad y frecuencia.
- La vida útil de la estructura no finaliza con la aparición de la primera fisura en el punto más crítico, sino cuando es evidente en superficie, por la presencia de diferentes grados de fisuración y/o deformaciones plásticas.

Los refuerzos con capas de mezcla asfáltica en caliente sobre pavimentos asfálticos son la tipología de refuerzos más difundida. Los modelos tradicionales de análisis en estos casos varían desde los basados en criterios ingenieriles hasta los que implican procedimientos mecánicos-empíricos. Si el pavimento existente está adecuadamente reparado previo al refuerzo, generalmente puede obtenerse un modelado satisfactorio. Los materiales flexibles usados en los pavimentos existentes y en los refuerzos posibilitan que programas basados en capas elásticas sean aplicados a los propósitos del diseño (Huang, 2004).

Una variedad de métodos han sido utilizados por diversas agencias y reparticiones viales para el modelado de refuerzos asfálticos. Antes de 1960, la mayoría de éstas fundaban sus decisiones fuertemente en criterios ingenieriles y en la experiencia en la aplicación de determinado espesor o tipo de refuerzo requerido. Desde 1960, el uso de ensayos de deflexión no destructiva ha ganado aceptación. Se han desarrollado variados modelos racionales basados en mediciones de deflexión para evaluar las condiciones in-situ del pavimento. Como en el análisis de nuevos pavimentos, la mayoría de las agencias tienen en el presente su propio método para el modelado de refuerzos (Huang, 2004).

Usualmente, el procedimiento para el modelado de los refuerzos es similar al de los pavimentos nuevos, excepto por el hecho de que las condiciones de vida remanente del pavimento existente y el propio refuerzo entran en consideración. Una opción es la de considerar el pavimento existente como nuevo, o como teniendo 100 % de vida remanente. En estos casos, el método de modelado del refuerzo puede ser aplicado como si se tratase de un diseño de un pavimento compuesto nuevo. Pero esta forma de análisis resulta muy simplista, por lo que la técnica ha avanzado hacia formas de tratamiento más complejas (Huang, 2004). Sin importar cual sea el método de modelado utilizado, es importante efectuar un análisis de las condiciones del pavimento y subdividir la obra en estudio en secciones homogéneas de análisis basadas en la edad, tránsito, materiales y condiciones del pavimento. Los deterioros de importancia en el pavimento existente deben ser adecuadamente reparados antes de colocar el refuerzo asfáltico en caliente. Si se detecta más de una sección de análisis, se deben efectuar consideraciones en cuanto a practicidad y costo, para decidir si diseños de refuerzo por separado deben ser desarrollados para cada sección de análisis o qué secciones deben ser tomadas en forma combinada.

Tres métodos tradicionales pueden ser utilizados para el modelado de refuerzos, desde el punto de vista de: el espesor efectivo, las deflexiones y el análisis mecánico-empírico (Huang, 2004). A continuación se analizan estos modelos a modo informativo, pues no serán aplicados en los estudios posteriores.

3.2.1. Análisis mediante espesor efectivo

El concepto básico de este método es que el espesor requerido de refuerzo es la diferencia entre el espesor requerido de un pavimento nuevo y el espesor efectivo del pavimento existente, como se observa en la Ecuación 3-5.

$$h_{OL} = h_n - h_{efectivo} \quad (3-5)$$

Donde:

h_{OL} = espesor de refuerzo

h_n = espesor del pavimento nuevo

$h_{efectivo}$ = espesor efectivo del pavimento existente

El procedimiento asume que, como los pavimentos deteriorados han utilizado parte de su vida total, se comportan como si fueran de un espesor menor al que presentan. Dado que el espesor efectivo está basado en un tipo, condición y espesor de cada capa componente, este método es también denominado el procedimiento de análisis de componentes. Todos los espesores de materiales nuevos o existentes deben ser convertidos en espesores equivalentes de una mezcla asfáltica en caliente, en base a sus tipologías y condiciones. Este método es utilizado por el *Asphalt Institute* y el AASHTO, ambos de EEUU (Huang, 2004).

A los efectos de esta tesis en particular, resulta interesante observar que una versión modificada fue desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (*US Corps of Engineers*) para el diseño de pavimentos rígidos en aeropuertos (Tayabji y Okamoto, 1985). En la Ecuación 3-6 se observa el modelo mediante el cual se han volcado los resultados obtenidos de ensayos con tráfico a escala.

$$h_{OL}^n = h_n^n - Ch_e^n \quad (3-16)$$

En esta ecuación, h_e es el espesor del pavimento existente, que es diferente del espesor efectivo enunciado en la Ecuación 3-5; $n = 2$ para refuerzos no adheridos, $n = 1,4$ para refuerzos directamente emplazados y $n = 1$ para refuerzos totalmente adheridos; y C es un factor que va de 0,35 a 1,00 para el estado del pavimento existente de muy deteriorado a poco deteriorado, respectivamente.

Si bien, cabe observar, no habría una relación directa entre lo analizado para pavimentos rígidos y flexibles, si resulta interesante ver cómo se tiene en cuenta un factor de ponderación en cuanto al grado de adhesión que presenta el refuerzo del pavimento.

Para determinar el espesor efectivo de pavimentos existentes en términos de mezcla asfáltica en caliente, uno o más factores de conversión deben ser hallados. Si el pavimento existente es de espesor completo (*full depth*), el Método 1, basado en el Índice de Serviciabilidad Presente del pavimento existente (conocido como *PSI* por su sigla en inglés), puede ser utilizado para determinar el factor de conversión. Por otro lado, el Método 2, basado en las condiciones de cada capa en forma individual, debe ser utilizado para determinar los factores de conversión de cada capa.

La Figura 3-6 da los factores de conversión C aplicables en el Método 1. Las dos curvas en la figura reflejan las diferencias en el comportamiento después de la colocación del refuerzo. La curva superior, línea A, representa pavimentos con una reducida tasa de cambio en *PSI*, comparada con su tasa de cambio antes del refuerzo. La curva inferior, línea B, representa la tasa de cambio proyectada en *PSI* respecto de la misma antes del refuerzo y por lo tanto, es algo más conservadora. La elección entre las dos curvas es ampliamente materia de criterio y experiencia.

Los factores de conversión mostrados en la Figura 3-6 son aplicables sólo a mezclas asfálticas en caliente. Si son utilizadas mezclas con emulsiones asfálticas, deben aplicarse entonces también factores de equivalencia en tal sentido. El espesor efectivo de cada capa existente es calculado por el producto entre el espesor actual de cada capa, el factor de conversión y el factor de equivalencia apropiado. El espesor efectivo total es obtenido mediante la suma de los espesores efectivos individuales de todas las capas del pavimento, según la Ecuación 3-7.

$$h_{efectivo} = \sum_{i=1}^n h_i C_i E_i \quad (3-7)$$

Donde:

- $h_{efectivo}$ = espesor efectivo del pavimento existente
- h_i = espesor de la capa i
- C_i = factor de conversión de la capa i
- E_i = factor de equivalencia de la capa i
- N = número total de capas

En el Método 2, la condición de cada capa individual es evaluada y un adecuado factor de conversión C es seleccionado de la Tabla 3-1. El espesor efectivo es calculado con la Ecuación 3-8.

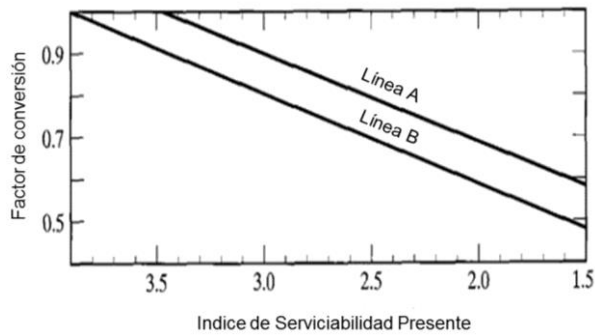


Figura 3-6. Factores de conversión para un pavimento *full depth*
Fuente: Huang, 2004 (traducción propia)

$$h_{efectivo} = \sum_{i=1}^n h_i C_i \quad (3-8)$$

El Método 2 puede también ser utilizado para pavimentos *full depth*. Si el *PSI* es conocido, se sugiere que tanto el Método 1 y 2 sean usados y los resultados comparados. Si bien los rangos en valores mostrados en la Tabla 3-1 están basados en análisis subjetivos, la experiencia ha demostrado que son razonables y utilizables en el modelado de refuerzos (Huang, 2004).

Para el cálculo del espesor de refuerzo, se considera la diferencia entre el espesor requerido de un pavimento nuevo *full depth* y el espesor efectivo del pavimento existente, según lo ya expresado en la Ecuación 3-5.

El espesor de un pavimento nuevo puede ser determinado de la carta de diseño de pavimentos *full depth* de la Figura 3-7.

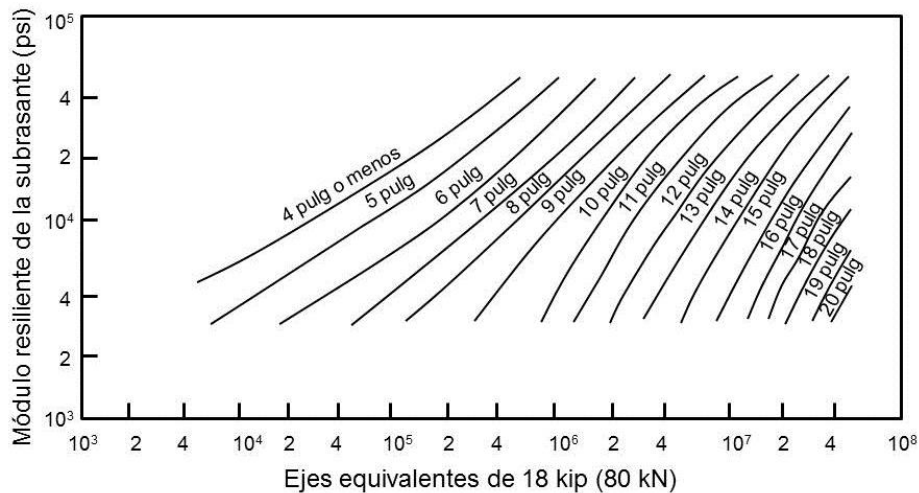


Figura 3-7. Carta de diseño para *full depth* con mezcla asfáltica en caliente
Fuente: Huang, 2004 (traducción propia)

3.2.2. Análisis por deflexiones

El concepto básico utilizado en este método es que la existencia de deflexiones superficiales importantes implican pavimentos y subrasantes débiles, que requieren de un refuerzo. Este último debe ser lo suficientemente grueso para reducir la deflexión a un valor tolerable (Bonfim, 2008; Huang, 2004). Usualmente, sólo la máxima deflexión directamente bajo la carga aplicada es medida. Este tipo de análisis no debe confundirse con la estimación de propiedades de un material *in situ* por medio de

mediciones con un deflector con multisensores, que son utilizadas en los modelos de espesor efectivo y mecánicos-empíricos (Huang, 2004).

Tabla 3-1. Factores de conversión para determinar el espesor efectivo
Fuente: Huang, 2004 (traducción propia)

Material	Descripción	Factor de conversión
I	a) Suelos naturales en todos los casos b) Subrasante mejorada, materiales predominantemente granulares, puede contener algo de limo y arcilla, pero tiene IP de 10 o menor c) Subrasante estabilizada con cal constituida de suelos de alta plasticidad, con IP mayor a 10	0,0
II	Subbase o base granular, razonablemente bien graduada, agregados duros con algo de finos plásticos y VSR no menor a 20. Usar la parte superior del rango si el IP es 6 o menos y la parte inferior si el IP es mayor a 6	0,1 - 0,2
iii	Estabilizado suelo cemento o con cenizas volantes, subbases y bases constituidas de suelos de baja plasticidad, IP de 10 o menos	0,2 - 0,3
IV	a) Capas superficiales con emulsión asfáltica o asfalto diluido, y bases que muestren excesiva fisuración, considerable desprendimiento o degradación de agregados, apreciable deformación en la zona de rodadura y pérdida de estabilidad b) Pavimentos de concreto (incluyendo aquellos bajo superficies asfálticas) que han sido disgregados en piezas menores a 0,6 m en su máxima dimensión, previo a contruir el refuerzo. Usar el límite mayor del rango cuando existe subbase y el menor cuando la losa apoya sobre la subrasante. c) Bases estabilizadas con cal o cemento que han desarrollado fisuras por contracción, reflejadas en la superficie. Usar la parte superior del rango cuando las fisuras son estrechas y apretadas, y la parte inferior con fisuras anchas, bombeos o evidencias de inestabilidad	0,3 - 0,5
V	a) Superficies de concreto asfáltico y base que muestren apreciable fisuración. b) Capas superficiales con emulsión asfáltica o asfalto diluido y bases que muestren algo de fisuras finas, desprendimiento o degradación de agregados, y leve deformación en la zona de roderas, pero permanezcan estables c) Pavimentos de concreto apreciablemente fisurados y deteriorados (incluyendo aquellos bajo capas asfálticas) que no pueden ser efectivamente sellados. Losas fragmentadas, variando en tamaño desde aproximadamente 1 a 4 m ² , y que han sido bien asentados sobre la subrasante mediante pesados rodillos neumáticos	0,5 - 0,7
VI	a) Superficies de concreto asfáltico y bases que muestran algo de finas fisuras, parámetros leves de fisuración y leve deformación en la zona de roderas, pero permanecen estables. b) Capas superficiales con emulsión asfáltica o asfalto diluido y bases que son estables, generalmente sin fisuras, sin exudación y que muestren leve deformación en las roderas. c) Bases de concreto, bajo superficies asfálticas, que son estables, sin bombeo y muestran un poco de fisuras reflejas	0,7 - 0,9
VII	a) Concretos asfálticos, incluyendo bases de concreto asfáltico, generalmente no fisuradas y con poca deformación en la zona de roderas b) Pavimentos de concreto que son estables, sellados y no fisurados c) bases de concreto, bajo superficies asfálticas, que están estables, sin bombeo y mostrando poca fisuración refleja superficial	0,9 - 1,0

El modelo de análisis por deflexión se basa en las relaciones empíricas entre deflexiones en pavimentos y espesores de refuerzo, y ha sido utilizado por un gran número de reparticiones (Huang, 2004).

Las deflexiones de los pavimentos son medidas con la regla Benkelman. Las condiciones de ensayo y los datos de deflexión son utilizados para establecer la sección de análisis. Al menos 10 mediciones de deflexión deben realizarse en cada sección de análisis, o sino un mínimo de 13 mediciones/km. Las temperaturas del pavimento son medidas al momento de la medición de la deflexión y pueden ser ajustadas a la temperatura estándar de 21 °C. Se recomienda emplear una técnica aleatoria de muestreo para seleccionar las ubicaciones de las mediciones de deflexión.

Cuando se han completado los ensayos de deflexión de la sección, los datos recolectados son utilizados para determinar la deflexión característica (*RRD* por su sigla en inglés) de la Ecuación 3-9.

$$\delta_{rrd} = (\bar{\delta} + 2s)\eta c \quad (3-9)$$

Donde:

- δ_{rrd} = deflexión característica
- $\bar{\delta}$ = deflexión promedio
- s = desvío estándar
- η = factor de ajuste por temperatura
- c = factor de ajuste por período crítico

El uso de dos desviaciones estándar por encima de la media implica que el 97 % de las mediciones son menores que la δ_{rrd} . Puntos dentro de la sección de análisis con deflexiones mayores a δ_{rrd} se recomienda tengan un tratamiento especial. Se sugiere que deflexiones adicionales sean realizadas para determinar la extensión de estas áreas débiles. Estos sectores pueden requerir su reemplazo antes de aplicar el refuerzo.

La Figura 3-8 da los factores de ajuste por temperatura para distintos espesores de bases de agregado densamente graduados. Un espesor de base de 0 corresponde a un pavimento asfáltico *full depth*. Las temperaturas tienen su mayor efecto en pavimentos *full depth*, observándose que el efecto disminuye a medida que el espesor de la base granular se incrementa.

El periodo crítico para las estructuras es el intervalo durante el cual el pavimento es más propicio a ser dañado por cargas pesadas. En áreas con congelamiento, este periodo será durante o después del deshielo de primavera. Si las mediciones de deflexión son realizadas durante el periodo crítico, el factor de ajuste c es igual a 0. Si las deflexiones no son realizadas durante el periodo crítico, c es mayor que 1 y puede ser determinado mediante los registros continuos de deflexiones sobre pavimentos similares. Si no se cuenta con registros comparables, c debe ser seleccionado mediante la aplicación del criterio ingenieril.

En cuanto a las deflexiones después del refuerzo, debe tenerse en cuenta que en el desarrollo del procedimiento de diseño, el pavimento reforzado fue considerado como un sistema de dos capas, con la Capa 1 de refuerzo de mezcla asfáltica en caliente y la Capa 2 de pavimento existente. La deflexión característica δ_{rrd} se utiliza para determinar el módulo de la Capa 2. Se obtiene la Ecuación 3-10, si se asume que el pavimento existente es un semi-espacio homogéneo, con una relación de Poisson de 0,5.

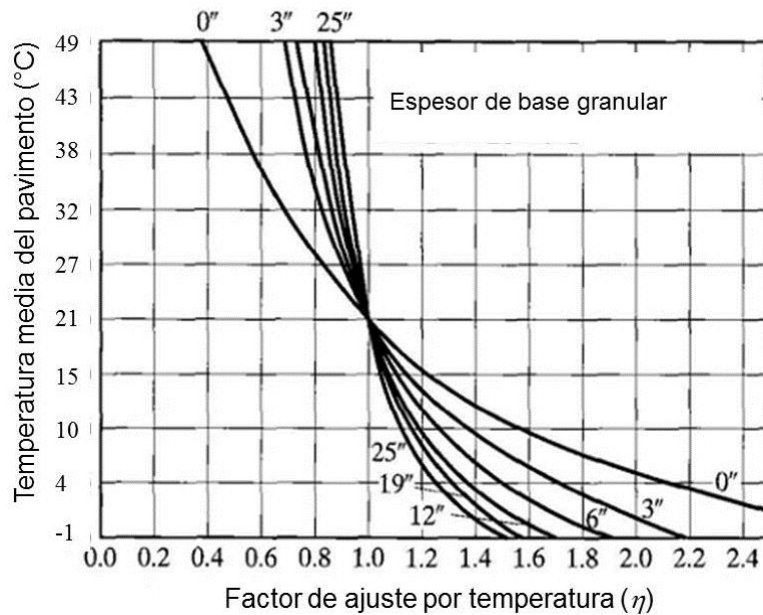


Figura 3-8. Factores de ajuste por temperatura para una base granular
Fuente: Huang, 2004 (traducción propia)

$$E_2 = \frac{1,5qa}{\delta_{rrd}} \quad (3-10)$$

Donde:

- E_2 = módulo del pavimento existente
- q = presión de contacto (se asume 483 kPa)
- a = radio del área equivalente de eje simple que representa al eje dual (163 mm)

La deflexión esperada después del refuerzo es denominada deflexión de diseño (δ_d) y puede ser determinada aproximadamente por la Ecuación 3-11.

$$\delta_d = \frac{1,5qa}{E_2} \left(\left\{ 1 - \left[1 + 0,8 \left(\frac{h_1}{a} \right)^2 \right]^{-0,5} \right\} \frac{E_2}{E_1} + \left\{ 1 + \left[0,8 \frac{h_1}{a} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{1/3} \right]^2 \right\}^{-0,5} \right) \quad (3-11)$$

Donde:

- h_1 = es el espesor de refuerzo
- E_1 = es el módulo del refuerzo (asumido en 3,5 GPa)

Para el diseño del espesor de refuerzo se asume que hay una única relación entre la deflexión de diseño en pulgadas y los ejes equivalentes admisibles (*ESAL* por su sigla en inglés), como muestra la Figura 3-9 y representa la Ecuación 3-12.

$$\delta_d = 1,0363(ESAL)^{-0,2438} \quad (3-12)$$

Dado los *ESAL* para el refuerzo, δ_d puede ser determinada con la Ecuación 3-12. Dada la deflexión característica, E_2 puede ser obtenida con la Ecuación 3-10. Con estos valores y con q , a y E_1 asumidos, el espesor de refuerzo h_1 puede ser calculado con la Ecuación 3-11. La Figura 3-10 muestra la carta de diseño relacionando *ESAL* y δ_{rrd} a espesores de refuerzo.

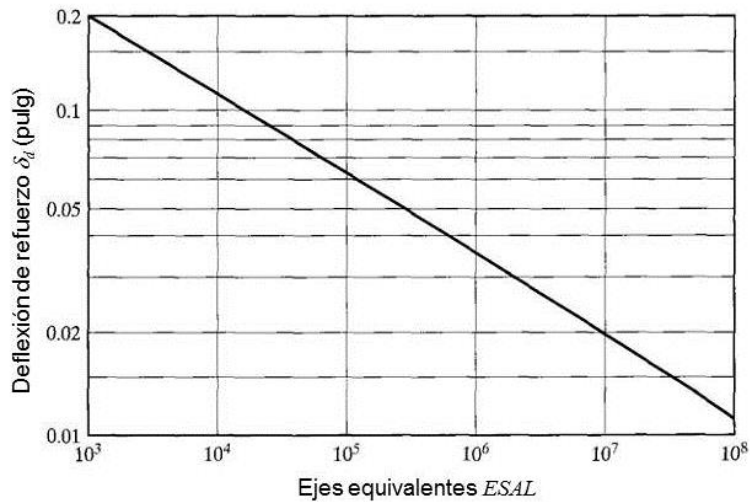


Figura 3-9. Relación entre deflexión y ejes equivalentes
Fuente: Huang, 2004 (traducción propia)

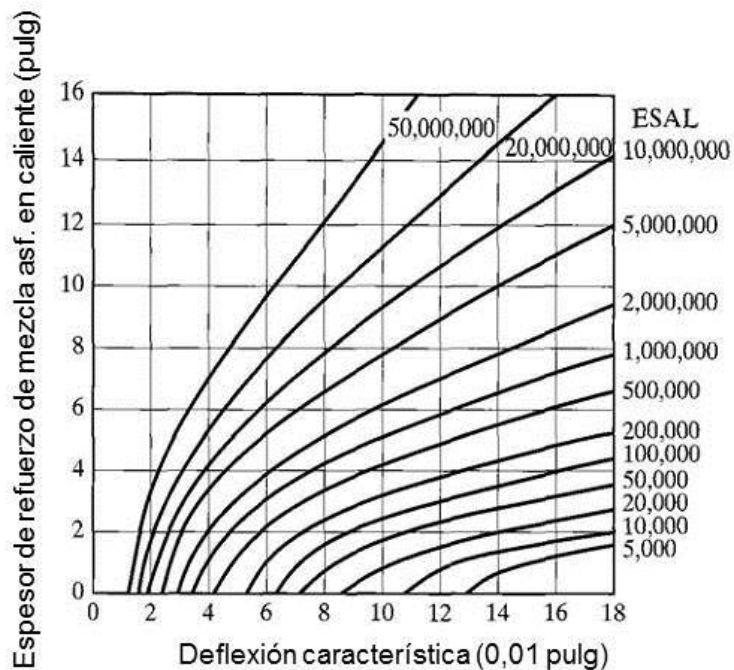


Figura 3-10. Carta de diseño de refuerzos basada en ejes equivalentes y deflexiones
Fuente: Huang, 2004 (traducción propia)

3.2.3. Análisis mecánico-empírico

El análisis mecánico-empírico es la herramienta capaz de permitir tanto la consideración de gran cantidad de los aspectos involucrados en el comportamiento estructural, como así también posibilitar la innovación en la utilización de diferentes materiales (Giovanon y Pagola, 2012).

Al priorizar los aspectos de mayor peso recomendados por la bibliografía, en este análisis se puede plantear un modelo multicapa seudo dinámico, con la posibilidad de considerar el comportamiento no lineal de los materiales.

En lo que concierne al modelado de un pavimento nuevo, este método requiere la determinación de las cargas críticas, deformaciones o deflexiones en un pavimento mediante algún método mecanicista y la predicción de los daños resultantes por algún criterio de falla empírico (Huang, 2004; Giovanon y Pagola, 2012).

Como primer paso debe evaluarse la condición o vida remanente del pavimento existente. Basado en esta evaluación se determina entonces el espesor de refuerzo, para que los daños, tanto en el pavimento existente o en el refuerzo, se ubiquen dentro de los límites permitidos (Huang, 2004). Los modelos estructurales actuales permiten obtener los siguientes deterioros de superficie (Giovanon y Pagola, 2012):

- Ahuellamiento
- Porcentaje de fisuras
- Porcentaje de baches
- Rugosidad
- Índice de Estado

No obstante lo expresado, los criterios de falla que han sido usados más frecuentemente para el modelado de refuerzos flexibles son la fisuración por fatiga y la deformación permanente (Huang, 2004; Giovanon y Pagola, 2012).

El modelo de la Ecuación 3-13 puede ser utilizado en pavimentos existentes que poseen vida a fatiga remanente. Si el pavimento existente no tiene vida remanente, el refuerzo debe ser considerado como la capa superior de un sistema de dos capas con un módulo de la subrasante dependiente de las condiciones del pavimento existente.

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} < 1 \quad (3-13)$$

Donde:

- n_i = número actual de repeticiones de carga del grupo de cargas i
- N_i = número admisible de rep. de carga para el grupo de cargas i
- m = es el número de grupos de cargas

Para la fisuración por fatiga se asume, a manera de una sencilla ilustración, que el diseño está basado en una carga simple equivalente. Este método puede ser aplicado del mismo modo para varias cargas de ejes, al utilizar el concepto de daño acumulado y adicionar las relaciones de daño de todos los grupos de cargas. Primero la vida remanente del pavimento existente es estimada con la Ecuación 3-14.

Segundo, basado en las fuerzas de tensión o esfuerzos en el lado inferior de la capa existente luego del refuerzo, se determina el número admisible de repeticiones de carga en los pavimentos reforzados. Como los pavimentos existentes no son nuevos y tienen una vida remanente n_r/N_a , en los pavimentos reforzados, las repeticiones admisibles deben ser corregidas por esa relación.

$$\frac{n_r}{N_a} = 1 - \frac{n_e}{N_a} \quad (3-14)$$

Donde:

- n_r = número adicional de repeticiones de carga que pueden ser aplicadas al pavimento existente después de su refuerzo
- N_a = es el número admisible de repeticiones de carga del pavimento existente antes del refuerzo
- n_e = número de repeticiones de carga actuales en el pavimento existente antes de su refuerzo

Para la deformación permanente se asume que el ahuellamiento existente, si lo hay, se llenará y el desarrollo de ahuellamiento no tiene nada que ver con el tránsito previo. Por esto, la deformación se presenta como una función sólo del tránsito adicional a ser aplicado sobre la nueva estructura de pavimento con refuerzo.

Si el esfuerzo de compresión vertical en la superficie de la subrasante es utilizado para controlar la deformación permanente, el esfuerzo sobre la subrasante previo al refuerzo es ignorado y sólo aquél después del refuerzo es utilizado para determinar el tránsito adicional admisible.

Un caso particular de estos modelos es el del análisis mecanicista-empírico por daño incremental. En estos modelos se analiza, mediante la aplicación de diferencias finitas, la evolución de los materiales en el tiempo conjuntamente con los aspectos estacionales del tránsito y el clima. La solución para cada paso incremental se obtiene mediante la resolución de la función de tensiones (Giovanon y Pagola, 2012).

3.3. Modelizado mecanicista complejo de la interfase

Las formas de encarar el modelado estructural citadas no permiten ver fácilmente cómo podría reflejarse la existencia de texturas de diversos grados en la interfase, pues se mantiene la incógnita en cuanto a cuál sería la manera de volcar los niveles de adherencia que pueden darse en las interfases y, más específicamente, en las interfases asfalto-asfalto ante la existencia de tareas de fresado en la misma. Bajo este concepto es que se continúa con los análisis en tal sentido. Para ello se aborda el concepto de los modelos mecanicistas “complejos”, en contraposición a los conceptos mecanicistas ya volcados, que en forma relativa se pueden considerar como “sencillos”.

La hipótesis más importante tenida en cuenta mayoritariamente en los métodos de modelado mecanicistas simples ha sido que la estructura de pavimento modelada es un sistema multicapas, en el cual las capas se encuentran totalmente adheridas una a otra. Esto facilita la modelación de la estructura y el proceso de cálculo. El modelo mecanicista puede entonces ser “simplificado” a uno de esfuerzos, tensiones y desplazamientos. Sólo unos pocos modelos simples habilitan la modelización de la interfase al utilizar un coeficiente de adherencia de 0 (no adherido) y 1 (totalmente adherido), pero esto ha demostrado en muchos casos no ser suficiente para la obtención de resultados representativos. Por esto, el apropiado modelizado de las condiciones de adherencia de la interfase representa un importante problema a ser encarado para el entendimiento del real comportamiento de las estructuras viales (Romanoschi, 1999).

La integridad de la adherencia de la interfase es más crítica cuando las cargas horizontales (por frenado, aceleración, pendientes, curvas, etc.) actúan en la superficie. Por esto, la hipótesis de sólo considerar esfuerzos verticales, utilizada en algunos modelos mecanicistas simples de diseño de pavimentos, basados en el cálculo de esfuerzos y deformaciones, puede llevar a importantes errores en la estimación de la vida útil del pavimento.

Un antecedente de análisis más complejos, es el de la Universidad de Illinois, en la cual se ha empleado el modelo BISAR, desarrollado por la firma Shell, para calcular la vida útil de una estructura con refuerzo asfáltico de un pavimento asfáltico (Shahin et al., 1987). En el estudio se consideraron distintas condiciones de interfase, módulos y espesores del refuerzo. El modelo BISAR habilita la modificación de las condiciones de deslizamiento entre capas, dado que el desplazamiento relativo entre capas es

proporcional a la transferencia de los esfuerzos de corte a través de la interfase, de acuerdo a la Ecuación 3-15, conocida como Ley Constitutiva de Goodman.

$$\Delta = k * \tau \quad (3-15)$$

Donde:

Δ = desplazamiento relativo entre capas [m]

τ = esfuerzo de corte original transmitido a través de la interfase [N/m²]

k = coeficiente de deslizamiento, 0 para totalmente adherido y 1000 para totalmente deslizante [m³/N]

El estudio revela que para el caso de un pavimento totalmente adherido, la máxima tensión de tracción permanece en la parte inferior de la capa asfáltica original y que el refuerzo se mantiene comprimido, mientras que para el caso de un pavimento con deslizamiento total, el esfuerzo de tracción en la parte inferior del refuerzo es mayor que el de la parte inferior de la capa asfáltica existente, en tanto que el esfuerzo vertical en la subrasante se incrementa cuando la adherencia se pierde. Otro importante hallazgo es que, para el caso de deslizamiento libre, la vida útil del pavimento decrece cuando el espesor de refuerzo se incrementa hasta 15 cm. Para refuerzos mayores a 15 cm, la vida útil del pavimento se incrementa levemente al aumentar el espesor. También, para espesores delgados de refuerzos (de entre 2,5 cm a 7,5 cm) totalmente deslizables, la vida útil del pavimento decrece con el incremento de la rigidez del refuerzo, dado que un concreto asfáltico más rígido es más susceptible a la fatiga. Los cálculos probaron que refuerzos delgados tienen menores efectos en las deflexiones superficiales cuando se cuenta con una condición de deslizamiento total. Los valores calculados de deflexiones superficiales indicaron que la condición de la interfase tiene una baja influencia en la deflexión superficial. Por el contrario, éstas se encuentran influenciadas por el área del cuenco de deflexión. Finalmente, del estudio se deduce que, al tener en cuenta la alta variabilidad de las capas de pavimento en cuanto a espesor y rigidez, la detección de las condiciones de adherencia a partir de datos de deflexiones solamente se torna dificultosa.

Por otro lado, diversos autores señalan que las pruebas de corte directo mediante dispositivos creados a tales efectos, permiten obtener curvas cuyas formas son similares a las obtenibles mediante el ensayo Marshall para concretos asfálticos y en ensayos de corte directo en suelos. Estos ensayos permiten establecer los parámetros necesarios para la aplicación de la Ley Constitutiva de Goodman (Ecuación 3-15) en casos particulares. En esos casos se puede adoptar para describir el comportamiento de la interfase a $K = 1/k$ como módulo de reacción horizontal de la interfase, donde la resistencia de la interfase se calcula como el pico del esfuerzo de corte de la curva (Uzan et al., 1978).

En base a estos conceptos puede pensarse, entonces, que los modelos mecanicistas complejos que abordan la temática en estudio, pueden basarse en ensayos como los citados. De esta manera, se configuran, por su finalidad, lo que puede denominarse como “modelos mecánicos de interfase”.

3.3.1. Base teórica de los modelos mecánicos de interfase

Durante el deslizamiento, las interfases están sujetas a dos movimientos relativos (Romanoschi, 1999):

- Movimiento normal de la interfase con resultados en la separación de las superficies en contacto (comportamiento dilatante).
- Movimientos tangenciales en el plano de la interfase.

Durante el movimiento, la destrucción de la adherencia en las zonas de contacto (contacto horizontal), la resistencia al movimiento de dilatación y el fraccionamiento de las asperezas que interfieren con el movimiento (contacto lateral), contribuyen a la energía de disipación. Una aproximación simplificada es la de considerar esas energías como sumadas a la energía de fricción. Entonces, la energía de fricción puede ser expresada como una función de la resistencia de los materiales, la altura de las asperezas y la adhesión entre las superficies.

El movimiento de traslación puede ser descrito por un modelo mecánico de alguna tipología dada. Los modelos rígido-elástico-plástico, elástico-plástico y generalizado elástico-plástico son los más comúnmente usados, con sus parámetros derivados de procedimientos analíticos de la ecuación de movimiento. De entre ellos, el de interpolación trigonométrica es probablemente el más sencillo. En éste, la curva de esfuerzo de corte obtenida durante los ensayos de laboratorio es discretizada, y los coeficientes de Fourier son calculados para establecer la ecuación de movimiento en una forma cerrada. Dado que las curvas de esfuerzos dependen del nivel de los esfuerzos normales, los coeficientes de Fourier deben ser establecidos para cada nivel de esfuerzo normal. Como resultado, un conjunto de coeficientes es obtenido al final de cada análisis de regresión.

En forma genérica, es muy importante, por lo tanto, relacionar el modelo mecánico a la magnitud del esfuerzo normal y al tamaño de la aspereza. La probabilidad de la función de densidad y la función de variación son típicamente soluciones de este problema. La tarea reside entonces en relacionar esto con el resultado de ensayos.

3.3.2. Ensayos de esfuerzo-desplazamiento al corte en pavimentos flexibles

Genéricamente, existe variada información que puede extraerse de un ensayo de una interfase (Romanoschi, 1999). La adherencia en la interfase puede ser medida por su esfuerzo, o sus relaciones de módulo/rigidez o trabajo/energía. Estos tres conceptos se demuestran utilizando valores típicos de relaciones de carga/deformación con ensayos, según puede observarse en la Figura 3-11 para un ensayo de corte directo.

Dado lo expresado, se pueden obtener parámetros que permiten describir el comportamiento de la interfase ante esta sollicitación:

- Uno de estos parámetros es la Máxima Tensión Tangencial, que será aquella alcanzada en el pico de la carga dividida por el área plana de las probetas ensayadas (Zang et al., 2016; Giovanon y Buono, 2008).
- El otro parámetro observable, es la curva que representa el trabajo absorbido por las probetas, que se obtiene mediante el registro continuo de cargas y deformaciones a lo largo del ensayo. El área encerrada por la curva representa el trabajo absorbido por la probeta durante el ensayo y su cálculo se efectúa mediante un análisis diferencial. Una mayor área implica un comportamiento más dúctil de la interfase, y por lo tanto menos rígido. En la Figura 3-12 se observan curvas de trabajo absorbido en el ensayo de tres muestras.

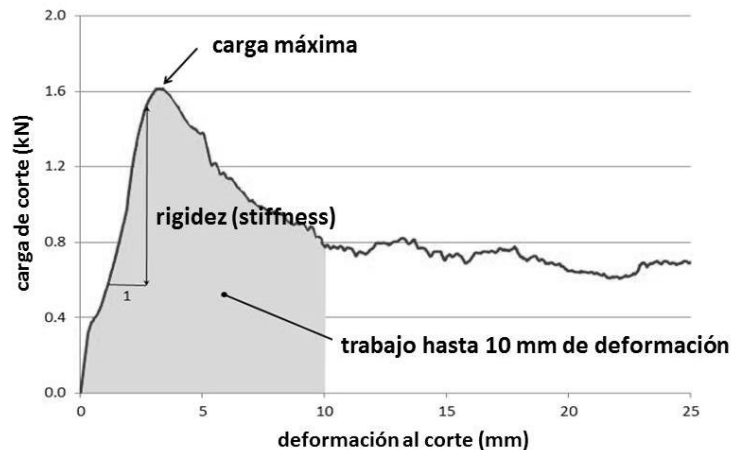


Figura 3-11. Ejemplo de diagrama carga/deformación en el corte directo
Fuente: White, 2015 (traducción propia)

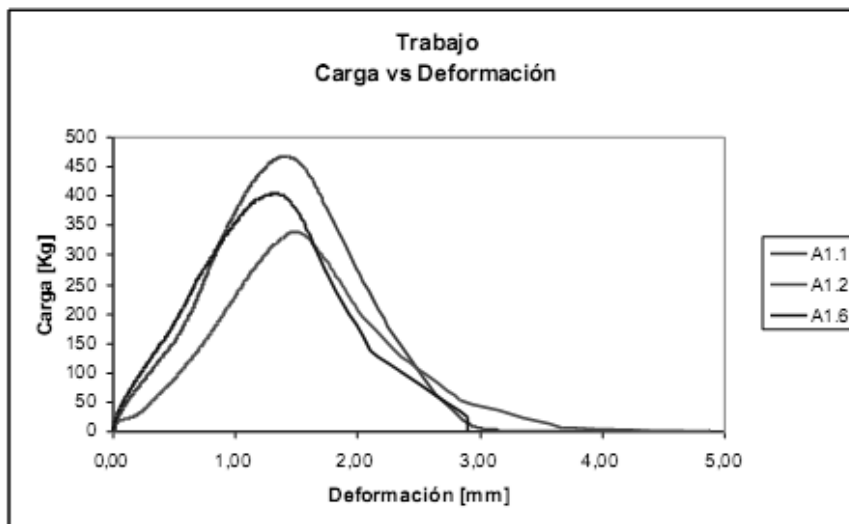


Figura 3-12. Curvas de trabajo absorbido en tres muestras ensayadas
Fuente: Ricci, 2011

Ante sollicitaciones estáticas hasta rotura, Romanoschi (1999) ha obtenido gráficas de las curvas típicas de esfuerzo de corte vs. desplazamiento y esfuerzo normal vs. desplazamiento al corte, en su estudio de interfases entre capas asfálticas, como las que se observan en la Figura 3-13.

Allí se tienen 5 puntos de la curva de esfuerzo de corte vs. desplazamiento (señalados como 0, 1, 2, 3 y 4), que permiten distinguir a cuatro segmentos de la misma:

- Segmento 0-1: comportamiento lineal, caracterizado por un bajo módulo de reacción de la interfase K_I . En esta etapa, la distribución de fuerzas de corte no es uniforme en la totalidad del área de la interfase. La extensión de este sector depende en gran medida de la superficie de contacto entre las probetas asfálticas y su soporte metálico. Dada la diferencia entre el diámetro de la probeta y el diámetro interno de su zuncho metálico de sujeción, la probeta puede no estar fijada adecuadamente y se mueve levemente hasta que las fuerzas de corte están uniformemente distribuidas en el área de la interfase. El Punto 1 de cambio en el módulo de reacción de la interfase se establece de manera visual.

- Segmento 1-2: comportamiento lineal, con un alto módulo de reacción de la interfase, K_2 . Los esfuerzos de corte se encuentran uniformemente distribuidos debajo del área de la interfase. El desplazamiento de corte se incrementa linealmente con los esfuerzos de corte. La falla de la interfase tiene lugar cuando el esfuerzo de corte alcanza la resistencia al corte de la interfase, en el Punto 2.
- Segmento 2-3: sector de post-falla. Los dos cuerpos en la interfase no están completamente separados, la interfase aún muestra algo de resistencia al corte.
- Segmento 3-4: sector de fricción. Los dos cuerpos en la interfase están completamente separados. Un modelo de fricción caracteriza el contacto entre los dos cuerpos.

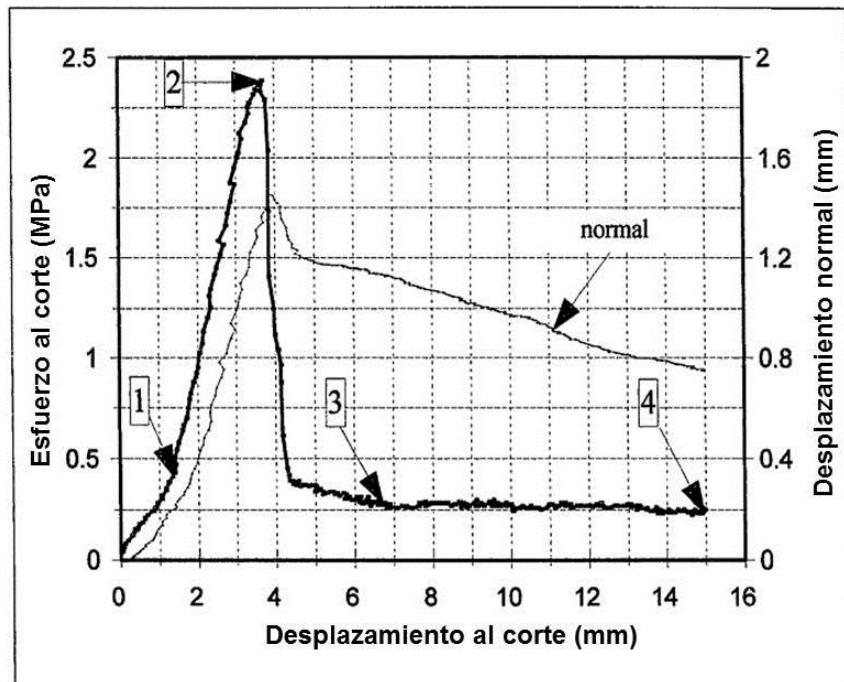


Figura 3-13. Gráfica típica de ensayos directos de cortes en interfases
Fuente: Romanoschi, 1999 (traducción propia)

El conjunto de parámetros que pueden analizarse para caracterizar la dependencia al corte de esfuerzo vs. deformación es entonces:

- K_1 : módulo de reacción de la interfase en el primer sector lineal, definido como la pendiente de la curva entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento de corte.
- TD_1 : desplazamiento de corte para el cual el módulo de reacción de la interfase cambia.
- K_2 : módulo de reacción de la interfase en el segundo sector. Definido como la pendiente entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento de corte de la curva, en la región donde el primero es uniformemente distribuido en el área de interfase.
- S_{max} : resistencia al corte de la interfase a la rotura.
- TD_2 : desplazamiento de corte en la rotura.
- ND_{max} : máximo desplazamiento normal entre los dos cuerpos.
- S_{frict} : resistencia a la fricción por unidad de área.
- μ : relación entre la resistencia a fricción por unidad de área y la presión normal, luego de la separación completa de los dos cuerpos.

En un principio, puede considerarse que también sería dable instrumentar, por medio de ensayos, análisis en cuanto a las propiedades a fatiga al corte de las interfases asfalto-asfalto. Las experiencias realizadas en tal sentido, de ensayos de fatiga al corte a relaciones constantes entre los esfuerzos normales y de corte, han permitido obtener curvas como la que se observa en la Figura 3-14, donde se ve una típica evolución del desplazamiento permanente al corte (*PSD* de su sigla en inglés) con el número de ciclos aplicados (Romanoschi, 1999). En la figura pueden identificarse dos etapas:

- Etapa inicial, donde el contacto entre la probeta y la fijación metálica no está del todo establecido. Esto lleva a errores en la medición de los desplazamientos de corte y normal. Es también posible que los granos de agregado en la interfase se reacomoden relativamente unos entre otros a medida que la resistencia al movimiento al corte se incrementa. Después de que una posición óptima es alcanzada, la resistencia al corte no se puede aumentar y la segunda etapa comienza. El punto de cambio en la tasa del incremento del *PSD*, que define el final de esta etapa, se establece visualmente en la figura.
- Etapa de desarrollo lineal, donde el *PSD* se incrementa a una tasa constante con el número de los ciclos de carga. El esfuerzo de corte está uniformemente distribuido sobre el área de la interfase, el contacto entre la probeta y las fijaciones metálicas y la posición óptima entre los granos en la interfase se ha establecido. El *PSD* se incrementa por encima del punto donde la interfase se fractura. La fricción entre las capas en contacto en la interfase continúa oponiéndose al movimiento relativo de las dos capas. Generalmente se observa allí una tendencia lineal.

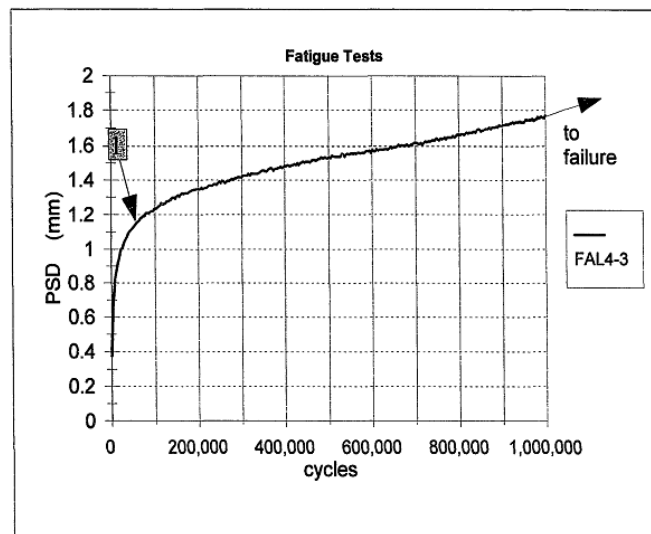


Figura 3-14. Curva típica de fatiga al corte
Fuente: Romanoschi, 1999

No obstante la existencia de estas experiencias, no han podido relevarse conclusiones generalizadas respecto de la resistencia al corte por fatiga. Esto se debe, principalmente, a la dificultad existente en determinar el punto de falla; dado que las fisuras pueden resultar en algunas instancias visibles en la interfase en toda la probeta, aun cuando no hay seguridad de que las dos capas estén realmente separadas. Esto claramente indica que el punto de quiebre no debería ser definido mediante observaciones visuales, y que deben profundizarse estudios en tal sentido, que escapen a los alcances planteados para la presente tesis.

3.3.3. Descripción del modelo aplicable en el estudio

Dada la naturaleza cíclica de la carga en las interfaces de pavimentos, sólo los dos primeros sectores elásticos del ensayo estático hasta rotura son utilizables en la descripción de las condiciones de la interfase. El sector de post-falla debe aparecer en el ciclo cuando la interfase llega a la rotura bajo el esfuerzo de corte. Por esto, no se efectúan análisis en esta tesis en cuanto a los parámetros para caracterizar el sector de post-falla, al considerar que luego de la falla las capas se encuentran completamente separadas.

El modelo constitutivo de interfase propuesto que describe la interfase asfalto-asfalto es un modelo de dos etapas. En la primera etapa, el desplazamiento de corte o el desplazamiento relativo de las dos capas en la interfase es proporcional a la fuerza de corte (modelo de Goodman), proporcionalidad proveniente del módulo de reacción de la interfase K en la dirección horizontal (Ecuación 3-16).

$$\tau = K \cdot \delta u \quad (3-16)$$

Al analizar nuevamente lo volcado en la Figura 3-13, puede tenerse en cuenta que en la mayoría de los casos el diámetro de la probeta es igual al del zuncho. Por esto, el primer sector elástico tiene continuidad con el segundo y $K_1 = K_2$. Esta es la causa por la cual, en el modelo constitutivo, puede analizarse directamente un módulo de reacción de la interfase K hasta el S_{max} .

Si se considera que las variaciones de resultados obtenibles a diferentes temperaturas pueden ser acotadas si se toma una temperatura de referencia, adoptada como representativa del caso en estudio, puede llevarse adelante el análisis simplificado de la situación. Además, en los antecedentes analizados (Romanoschi, 1999) se ve que en los casos de muestras sin la aplicación de un riego de liga se ha observado que el módulo de reacción de la interfase K difiere más fuertemente con el nivel del esfuerzo normal ejercido, que en los casos en que si está aplicado. Como mayoritariamente en esta tesis se analizan situaciones con riego de liga, puede pensarse entonces en un modelo resumido, en el cual la primera etapa de la curva esfuerzo/deformación al corte se da cuando el esfuerzo al corte es menor que la resistencia al corte de la interfase (punto de falla S_{max}), dado que la interfase no ha llegado a su rotura. Una vez que la interfase ha fallado, y la segunda etapa comienza, la interacción entre capas puede ser descrita como de fricción simple, caracterizada por el coeficiente de fricción μ . Por lo tanto, como ya se ha explicado, la determinación de este último parámetro queda por fuera del alcance de la presente tesis. Este modelo constitutivo simplificado para la interfase asfalto-asfalto puede quedar representado, entonces, por lo que se observa en la Figura 3-15.

La dispersión de resultados en el módulo de reacción de la interfase K , la resistencia en la interfase S_{max} y el coeficiente de fricción μ obtenidos por Romanoschi (1999), permiten ver que, tanto el tipo de interfase como la temperatura, afectan notoriamente la resistencia y el módulo de reacción de la interfase. Además, ambos parámetros decrecen cuando la temperatura se incrementa. Los análisis estadísticos de resultados en cuanto a la incidencia del tipo de interfase (con o sin riego de liga) permitirían establecer que ésta no tendría efecto sobre μ , mientras que no habría un efecto concordante sobre K y S_{max} . Esto puede deberse a que cuando no existe un riego de liga, el incremento del esfuerzo normal lleva al incremento en el área de contacto y por lo tanto se generan mayores módulos de reacción y resistencia en la interfase. En cambio, cuando el riego de liga está presente, el incremento de la carga normal no lleva a este incremento del área de contacto, y por lo tanto el módulo de reacción y la resistencia de la interfase no se incrementarían. Esto último permite, a

los fines de esta tesis, independizarse en un principio de esa carga normal en la sistemática de ensayo empleada.

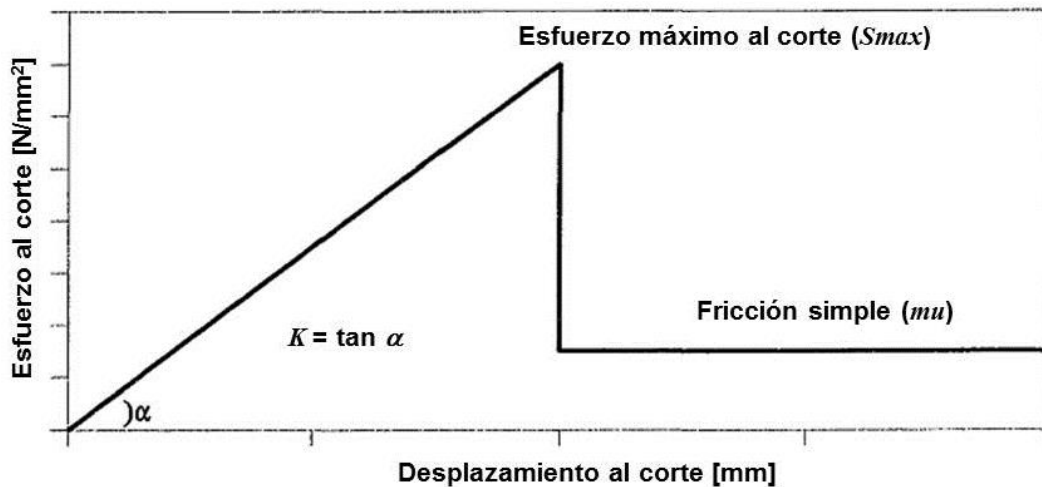


Figura 3-15. Modelo constitutivo simplificado de la interfase asfalto-asfalto
Fuente: Romanoschi, 1999 (traducción propia)

Se analiza en el punto siguiente las particularidades de la sistemática de ensayo principal a utilizarse en el desarrollo de la tesis, y se vuelve al final del capítulo a un ejemplo de cómo podría ser la aplicación de lo expresado en los párrafos anteriores en un análisis estructural.

3.4. El procedimiento de ensayo de corte a utilizarse en el estudio

En cuanto a la valoración de la adherencia, se puede decir que cuando hay adhesión la interfase puede ser ensayada, pues se cuenta con una mínima resistencia que permite que los elementos adheridos no se despeguen por su propio peso (Ricci, 2011). En nuestro país, sólo en forma reciente se han generado especificaciones técnicas para ciertas obras viales sobre adherencia de productos asfálticos en su función de riego de liga. El ensayo de referencia en éstas, es el conocido como de corte sobre testigos o de SBT (DNV, 2017); el cual al momento no posee normativa nacional para su empleo. No obstante esto, a nivel mundial existen numerosos ensayos para la valoración de la adherencia. Sin embargo, aún los distintos investigadores de la temática no se han puesto de acuerdo en forma generalizada en cuanto a cuál utilizar para evaluar la calidad de la adherencia o liga entre capas (Tosticarelli, 2002; Muench y Moomaw, 2008; Ricci, 2011).

Para analizar estos ensayos, cabe recordar que la sollicitación en la interfase de capas de pavimento puede responder a diversos esfuerzos característicos en función de la componente de carga (Rahman et al., 2016), entre los cuales pueden individualizarse los observados en la Figura 3-16.

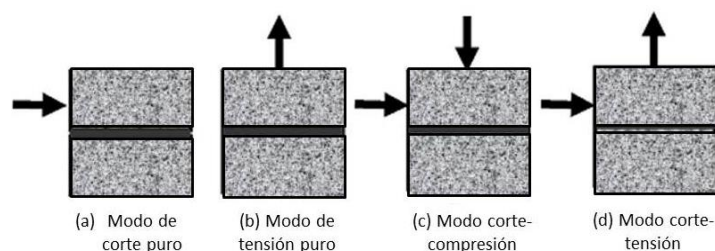


Figura 3-16. Diferentes condiciones de carga en la interfase del pavimento
Fuente: Rahman et al., 2016 (traducción propia)

Para traducir estas solicitaciones en esfuerzos aplicables en sistemáticas de ensayo, se han desarrollado métodos que generan alguna de las solicitaciones de ensayo que se observan en la Figura 3-17 (White, 2015).

Un listado de los diversos tipos de ensayos, que implican diferentes tipos de esfuerzo y tensiones resultantes (por esfuerzos de corte, por esfuerzo de tracción, por esfuerzo de torsión y ensayos no destructivos END), puede incluir a (Ricci, 2011):

- Ensayo de corte sobre testigos, Ensayo de Leutner o SBT
- Ensayo de tracción sobre testigos
- Ensayo de torsión sobre testigos
- Ensayo in situ proyecto MTQ (Ministère des Transports du Québec)
- Ensayo de corte sobre probetas LCB (Laboratorio de Caminos de Barcelona)
- Ensayo de arrancamiento (*Pull Off Test Method*)
- Ensayo de cizallamiento oblicuo (*Slant Shear Test*)
- Método de ensayo de Grzybowska
- Método de repique (*Impact Echo Method*)
- Método de cizallamiento (*Wedge Splitting Test*)
- Método de tracción directa (*Pure Tension*)
- Método de Iowa 406 (*Test Collar*)
- Ensayo de cizallamiento de Ancona (*Ancona Shear Testing*)

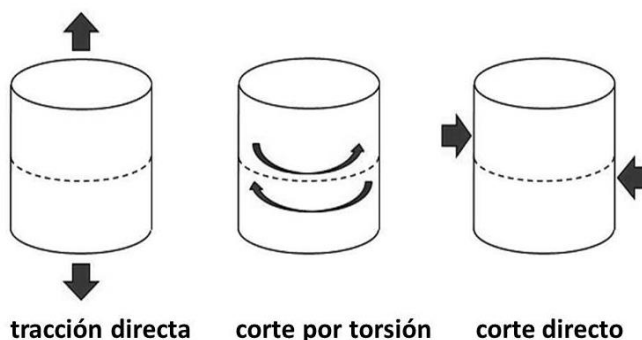


Figura 3-17. Métodos de ensayo principales en interfases
Fuente: White, 2015 (traducción propia)

Estos ensayos esquemáticamente responden a una amplia gama de solicitaciones en las interfases (Rahman et al., 2016; PMAM, 2013), como puede observarse en la Figura 3-18.

Se puede ver en el Anexo B una descripción de aquellos ensayos previamente enumerados que han sido dejados de lado a los efectos de la presente tesis, en función de los considerandos que se exponen a continuación.

Se ha establecido que la adherencia en la interfase se encuentra influenciada por la traducción de las cargas en esfuerzos (dirección de las mismas y velocidad de aplicación), la temperatura, el riego de liga (material, tiempo de curado y dotación) y la textura en la interfase. Esta última tiene un interés en particular, ya que numerosos autores manifiestan que su incremento resulta en una mejora en cuanto a la respuesta ante solicitaciones. Esto se debe a que se genera un incremento en el intertrabado mecánico y de la superficie de contacto. Se considera que la textura superficial es el parámetro principal en la determinación de la respuesta post-elástica de fricción entre las superficies (White, 2015).

El ensayo al corte aplica una sollicitación que se aproxima a la sollicitación real a la que se encuentra sometido el riego de liga en una estructura de pavimento. En ésta, el valor de adherencia que se obtiene se ve influenciado por la resistencia friccional que aportan los agregados pétreos de ambas caras de las superficies adheridas y la textura de dichas caras (Giovanon y Buono, 2008). Estos ensayos pueden conducirse bajo sollicitaciones cíclicas, que representan en forma ajustada al tránsito, pero resultan de muy compleja interpretación. Los esfuerzos a carga estática, en cambio, son una medida simplificada para calcular y se pueden interpretar intuitivamente desde el punto de vista de la falla por esfuerzo (White, 2015). Los ensayos de corte directo puro representan los equipos más comunes para la aplicación del desplazamiento de corte y el registro del esfuerzo de corte (D'Andrea et al., 2013).

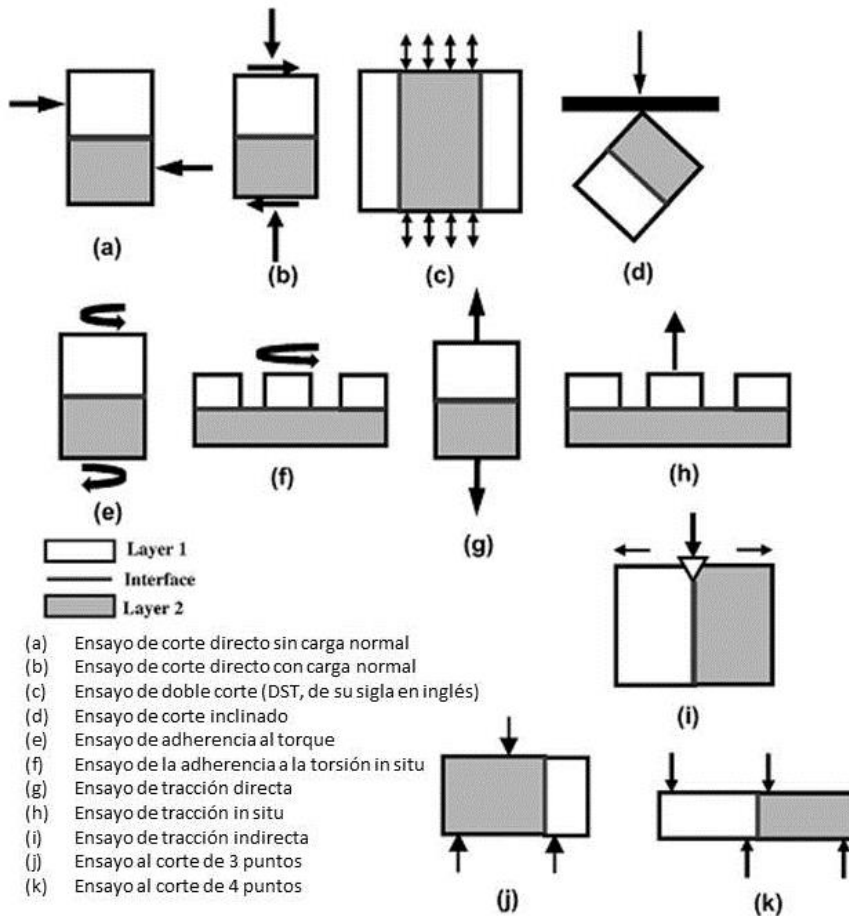


Figura 3-18. Esquemas de ensayos enunciados
 Fuente: Rahman et al., 2016 (traducción propia)

Para la realización del estudio se decide emplear un ensayo que genere un esfuerzo cortante en forma estática, pues se considera a esa sollicitación como representativa del comportamiento que se desea analizar en un pavimento. Como ya se expresara, los ensayos que generan esfuerzos cortantes registran un valor de adherencia que tiene en cuenta los aportes de las fuerzas de atracción físico-químicas y las fuerzas de entrelazado mecánico, y generan una valoración integral del mecanismo resistente de los sistemas multicapas que constituyen los pavimentos. El ensayo seleccionado para su aplicación en la presente tesis es el que solicita al corte directo por desplazamiento en forma paralela a la interfase del riego de liga en la dirección del ensayo de tracción de la prensa empleada. En la Figura 3-19 puede observarse una imagen de la realización de este ensayo, el cual no cuenta con una normativa asociada, razón por la cual debe diseñarse su procedimiento de aplicación.

White (2015) ha efectuado un relevamiento de los ensayos de corte directo existentes y señalado en cada caso la velocidad de carga, la temperatura de ensayo y la aplicación o no de una fuerza normal. En la Tabla 3-2 se observa una traducción del resumen por él generado.

A este resumen puede adicionarse el estudio realizado por Giovanon y Buono (2008) a nivel nacional, en el cual los ensayos se efectuaron a 25 °C, con una velocidad de deformación de 50 mm/min.

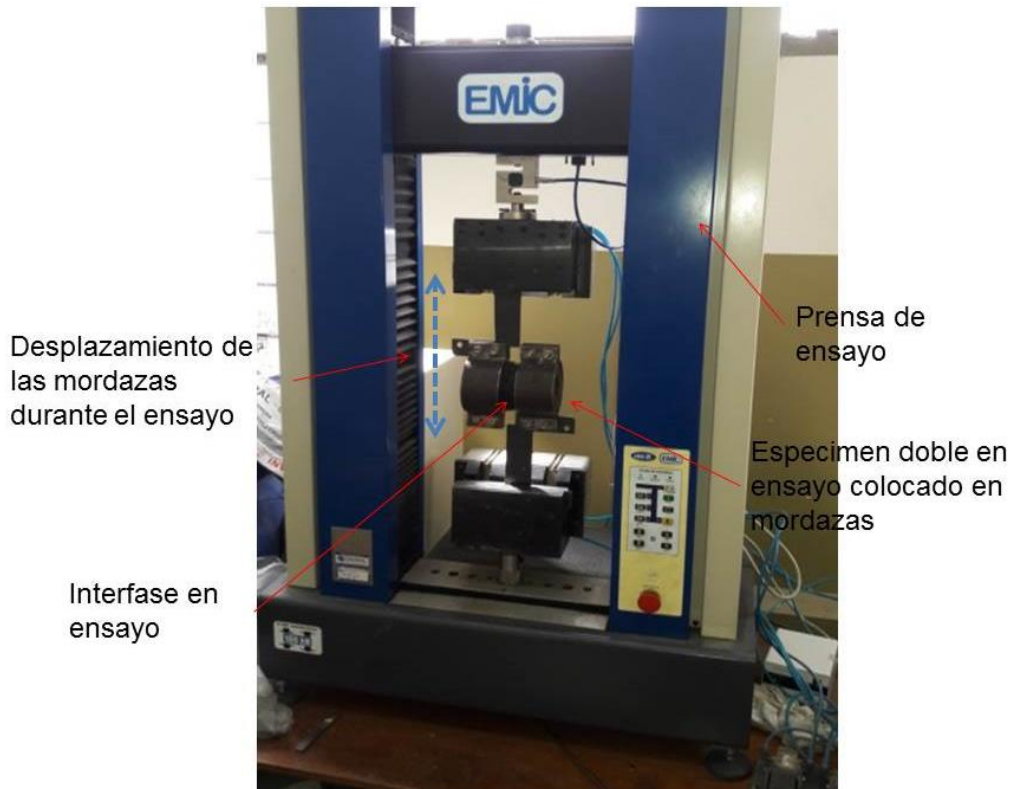


Figura 3-19. Imagen del tipo de ensayo seleccionado para el estudio
Fuente: elaboración propia

Como puede observarse, existen variaciones en cuanto a cómo estos parámetros de ensayo se aplican en cada una de las sistemáticas. En función de los datos recabados y de las experiencias efectuadas por Delbono (2014) y Ricci (2011) en las propias instalaciones del LEMaC, donde se realizan las tareas relacionadas con la presente tesis, se decide generar el esfuerzo cortante en el plano a evaluar, mediante una prensa capaz de ejercer el desplazamiento en el sentido de tracción en su dirección vertical. Ese desplazamiento se realiza a una velocidad de avance controlada de 1,27 mm/min. Esta velocidad, en las pruebas realizadas por los autores citados, ha sido la que mejor ha demostrado las variaciones aplicadas en las muestras analizadas.

Se decide además, establecer la temperatura de ensayo de 20 °C, por reflejar una temperatura representativa de la región central de la Argentina, la cual ha sido utilizada en experiencias previas y que puede ser fácilmente obtenible y mantenida mediante sistemas sencillos de acondicionamiento, tanto de las probetas como del ambiente de ensayo. En la Figura 3-20 se observa el ambiente de ensayo climatizado y cerrado empleado durante la tesis llevada adelante. Se establece para las experiencias un plazo mínimo de acondicionamiento a esa temperatura de 4 horas.

Tabla 3-2. Características de los ensayos de corte directo
Fuente: White, 2015 (traducción propia)

ENSAYO	VELOCIDAD DE CARGA	TEMPERATURA DE ENSAYO	CARGA NORMAL AL ENSAYO
Leutner Shear Test	Deformación controlada de 50 mm por minuto	A 21 °C	Sin carga
Superpave Shear Tester (SST)	Carga controlada de 222,5 N por minuto	No especifica	No especifica
Louisiana Interface Shear Strength Test (LISST)	Deformación controlada de 2,5 mm por minuto	A 5, 25 y 60 °C	De 207 kPa
Florida Shear Test	Deformación controlada de 50 mm por minuto	A 25 °C	Sin carga
ASTRA Interface Shear Test	Deformación controlada variable hasta distintas cargas	Variable	Fija una carga para cada combinación
Layr-Parallel Direct Shear Test (LPDS)	Deformación controlada variable hasta distintas cargas	Variable	Sin carga
NCAT Shear Test (o ALDOT 430 Test)	Deformación controlada de 51 mm por minuto	A 25 °C	Sin carga
Sapienza Horizontal Shear Test Machine (SHST)	Deformación controlada de 1,27 mm por minuto	A 20 °C	Con carga normal



Figura 3-20. Ambiente de ensayo climatizado empleado
Fuente: elaboración propia

Por otra parte, según White (2015), el ensayo de corte directo es considerado el más apropiado para la aplicación sobre testigos, sin embargo existen numerosas investigaciones que lo han aplicado sobre probetas moldeadas con interfases no texturizadas, como por ejemplo las llevadas adelante por Lysenko (2006), el grupo de investigación liderado por Medeiros (2012) y los de Bae (2010), West (2005) y Tayebali (2004). Cabe aclarar que estos estudios estuvieron mayoritariamente focalizados en analizar el material de liga y su dosificación. Se decide por esto efectuar las determinaciones sobre probetas moldeadas a tales efectos.

El equipo de estudio liderado por D'Andrea (2013), ha relevado memorias de trabajos en los cuales con el compactador Marshall se confeccionaron probetas dobles cilíndricas de 130 mm de alto y 100 mm de diámetro, mediante la compactación sólo de la cara superior. Mediante esta metodología, se ha alcanzado la densidad comunmente requerida del 98 % de la densidad de referencia (obtenida por 75 golpes/cara del compactador Marshall sobre una probeta de 63,5 mm de altura).

Ricci (2011) ha efectuado estudios de series de probetas dobles confeccionadas con una metodología de compactación análoga y ha determinado la distribución de densidades a lo largo de la altura de la probeta, para establecer posibles diferencias debidas a los distintos grados de energía aplicada. Para ello procedió a aserrar a las

probetas en tres tercios y concluyó que las diferencias de densidad halladas son estadísticamente despreciables.

Entre ambas capas de este tipo de probetas se materializa el tratamiento a ser analizado, el cual mayoritariamente conlleva un riego de liga con emulsión asfáltica, como ya fuera expresado. En campo el tiempo de curado especificado para este riego puede ir de unos pocos minutos a varias horas, en función de las características del mismo y de las condiciones del entorno. No obstante, es posible en los análisis en laboratorio estandarizar un lapso de curado si se utilizan estrategias a tales efectos (Yaacob et al., 2014). Estas estrategias se basan en el empleo de algún sistema acelerado de curado, como es el caso de una estufa a temperaturas cercanas a los 60 °C.

Dado todo lo analizado, se establece para esta tesis que las probetas a ensayarse, denominadas como “probetas dobles” (compuestas por espesores de 50 mm tanto de base como de capa de refuerzo), sean moldeadas siguiendo el siguiente procedimiento:

- Se coloca la mezcla asfáltica en un juego de base plana y molde cilíndrico (de 100 mm de diámetro interno y altura mínima de 100 mm), acondicionado en estufa a 140 °C durante 15 minutos. Para ello, se toma una cantidad suficiente de ésta para lograr una capa compactada de 50 mm de espesor (para el caso en estudio aproximadamente 1000 g). La mezcla debe presentar una temperatura correspondiente a una viscosidad del cemento asfáltico que la constituye de $2,8 \pm 0,3$ poises (para el caso en estudio 140 °C).
- Se acomoda la mezcla con una cuchara, se coloca un papel de filtro en la parte superior y se la compacta con el pisón Marshall mediante 100 golpes por única vez en su cara superior. Debe asegurarse la limpieza y temperatura del pisón.
- Se retira del molde la probeta (previo inmersión en agua durante 4 minutos), se la deja secar y, si lo hubiera, se aplica el tratamiento en estudio sobre la cara que estuvo en contacto con la base del molde (por ejemplo, la simulación del fresado a ser analizada en el Capítulo 6).
- Se aplica la dotación de riego de liga en estudio y se deja una hora de reposo en estufa a 60 °C, para que se produzca el corte y curado de la emulsión. Se deja enfriar la probeta a temperatura de laboratorio durante al menos otra hora.
- Se introduce la probeta con la cara tratada hacia arriba, sobre una base, en un nuevo molde cilíndrico de 101 mm de diámetro interno y altura mínima de 130 mm.
- Se acondiciona el conjunto de base, molde y probeta en estufa a 140 °C durante 15 minutos.
- Se introduce en el molde mezcla asfáltica en caliente en la cantidad necesaria para lograr una nueva capa compactada de 50 mm de espesor (para el caso en estudio aproximadamente 1000 g), en las mismas condiciones que la capa inferior. Se acomoda la mezcla con una cuchara y se coloca un papel de filtro en la parte superior. Se compacta con 100 golpes del pisón Marshall en su cara superior. Terminada la compactación se deja enfriar en agua por un lapso de 4 minutos y se desmolda.
- Se deja secar y enfriar la probeta obtenida a temperatura ambiente.

Puede realizarse otra aclaración respecto del ensayo a ser empleado, dado que para permitir el desarrollo de la interfase fresada se ha decidido separar los zunchos que toman la parte superior e inferior de la probeta doble unos 30 mm. Esto genera que, además de la deformación propia registrada en la interfase durante el ensayo, se tenga una deformación relacionada con ambas partes de la probeta en este sector. Lo

expresado puede observarse en la Figura 3-21. Esa deformación lleva físicamente también a que, además del esfuerzo de corte, se produzca una componente normal de tracción en la interfase, razón por la cual deberían obtenerse resistencias al corte menores que las obtenibles con el ensayo de SBT.

En resumen, se prevé obtener mediante el ensayo a ser utilizado resultados de TD y de S_{max} sólo comparables en forma relativa entre sí, y no con los especificados u obtenibles con otras metodologías de ensayo. En caso de necesitar aplicarse un análisis comparativo en tal sentido, se debería encontrar la manera de correlacionar los resultados en forma particular. Más adelante en este documento se profundizará el análisis en tal sentido.

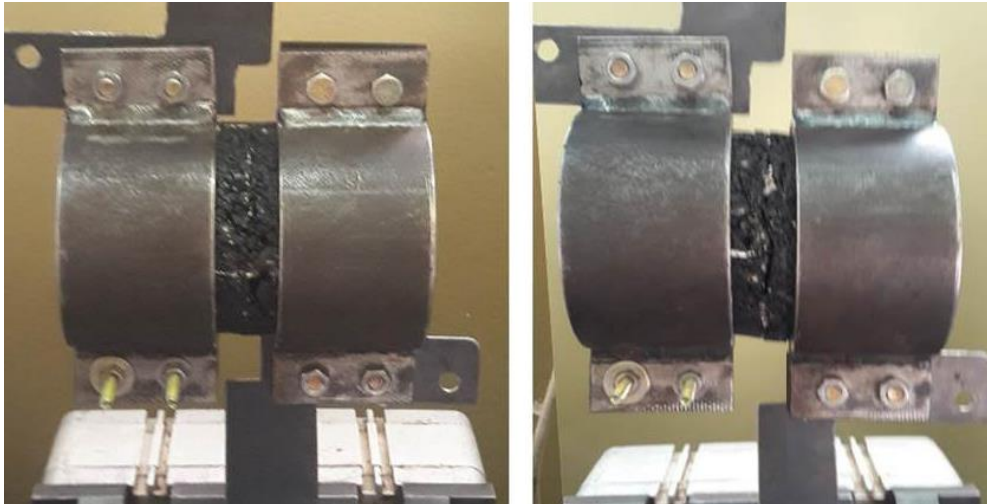


Figura 3-21. Deformación en la zona central de la probeta doble durante el ensayo
Fuente: elaboración propia

3.5. Modelado de la interfase fresada en programas de cálculo

Dado el alcance definido para la presente tesis, no se prevé la realización de cálculos que lleven a resultados puntuales en cuando al dimensionado de las tipologías de estructuras abordadas. De todos modos, a manera de complemento, cabe señalar que si se deseara efectuar el modelado de la interfase fresada, a partir de lo ya expresado en cuanto a la necesidad de contar con datos de TD y de S_{max} obtenidos mediante una metodología normalizada, que no es la finalmente aplicada en esta tesis (dada la distancia impuesta entre zunchos), se pueden utilizar los criterios que se detallan a continuación.

Para eso se toma como de referencia el programa ABAQUS, tal cual lo expresado por Romanoschi (1999) en sus estudios. Este programa está basado en un modelo de elementos finitos que permite resolver problemas de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en pavimentos multicapas. El mismo puede involucrar capas de comportamiento no lineal de subrasante y fundación, y cargas dinámicas. No obstante lo expresado, lo aquí conceptualmente mencionado podría ser adaptado para su instrumentación mediante otros programas análogos, razón por la cual no perdería en esencia validez en tales casos.

El programa ABAQUS utilizado para ejemplificar, ofrece una serie de elementos de articulación que pueden ser usados para modelar interfases. Estos elementos de articulación (denominados JOINTC) poseen dos nodos, no presentan dimensiones, y son arreglos de vínculos de traslación y rotación (denominados SPRING), y de guías paralelas (denominados DASHPOT) en un sistema local co-rotacional coordinado.

Mediante el programa se pueden incluir hasta seis opciones de SPRING y DASHPOT para definir el comportamiento de la articulación. Si no se da una especificación para una articulación en particular en cuanto a su movimiento relativo, el programa considera que ésta no posee rigidez con respecto a ese componente. Los elementos de articulación no pueden modelar fricción entre capas, dado que el esfuerzo tangencial en la interfase depende sólo del desplazamiento tangencial y sus derivados, y no de los esfuerzos normales. Por esto, la interfase entre capas puede ser eficientemente modelada por la característica de interacción de contacto de ABAQUS. La característica de interacción de contacto es comunmente utilizada para modelar la fricción entre superficies de dos cuerpos rígidos o elásticos, que se mueven uno respecto del otro. En función de la dinámica del sistema y de las fuerzas actuantes en el contacto entre dos superficies, éstas pueden penetrar una en la otra o no necesariamente permanecer en contacto durante el movimiento. También pueden ser incluidos en el modelo la transferencia de calor a través de la interfase, la generación de calor debido a la fricción o el flujo tangencial en la interfase en elementos de contacto con presión de poros.

En la característica de interacción de contacto, debe definirse una superficie maestra y otra esclava. Durante los pasos del análisis, la superficie esclava se deslizará sobre la superficie maestra. Cuando ésta es definida como rígida, la superficie esclava seguirá la forma de la superficie maestra sin deformarla. Cuando la superficie maestra es flexible, ambas superficies pueden deformarse. En cada uno de los pasos de análisis, el programa ABAQUS calcula la distancia más pequeña entre los nodos de la superficie esclava y la superficie maestra. En cada paso, los nodos de la superficie esclava pueden seguir, penetrar o alejarse de la superficie maestra. Dado el comportamiento señalado en la interfase, corresponde entonces modelar el caso en el cual los nodos de la superficie esclava pueden alejarse de la superficie maestra. Para esta opción el programa ofrece diferentes herramientas para modelar las relaciones de presión-vacíos así generadas:

- a) Contacto “pegajoso” (*sticky*), en el cual las presiones negativas, hasta cierto valor, pueden transmitirse a través de la interfase.
- b) Contacto “sin separación” (*no separation*), en el cual las condiciones de contacto de la interfase una vez establecidas, no se pueden romper.
- c) Contacto “ablandado” (*softened*), en el cual los continuos cambios de presión son función de los claros o vacíos existentes.
- d) Contacto “amortiguado” (*damped*), en el cual una presión viscosa es transmitida en función de si la superficie está en contacto o separada.

La característica de interacción de contacto puede ser convenientemente adaptada al modelo de interfase entre capas asfálticas al considerarlas como dos cuerpos rígidos que se mueven uno respecto del otro. La particularidad del problema está en que el área de contacto es mayor y las superficies permanecerán siempre en contacto, sin existir la posibilidad de zonas abiertas. En este caso debe ser utilizada la opción “*no separation*”.

Las relaciones carga/desplazamiento que describen el contacto entre dos superficies en una interfase de pavimento pueden ser modeladas como:

- a) Condición “unida” (*tied*). En este caso, cada nodo de la superficie esclava está unido al nodo más cercano de la superficie maestra. Los dos nodos tendrán el mismo desplazamiento y rotación, pues se encuentran unidos uno a otro.
- b) Fricción simple, completamente caracterizada por el coeficiente de fricción μ . La resistencia al movimiento es proporcional a la presión normal en la interfase.

- c) Condición “pegada” (*stick*), cuando el esfuerzo tangencial es menor que el valor admisible S_{max} (o τ_{max}). El módulo de reacción de la interfase K (o relación esfuerzo/desplazamiento) y el esfuerzo máximo tangencial τ_{max} no dependen del nivel de esfuerzo normal en la interfase. El módulo K no es un parámetro variable, pero hay un deslizamiento tolerable, o máximo deslizamiento elástico al pegado, $d_{max} = \tau_{max}/K$. Cuando τ alcanza la τ_{max} o d alcanza la d_{max} , la condición de interfase se convierte en una condición de fricción simple, caracterizada por el coeficiente μ .
- d) Una condición definida por el usuario, para la cual la relación entre los esfuerzos tangenciales y desplazamientos deberá ser descrita de manera incremental. La relación puede incluir términos como la magnitud de la carga normal, la temperatura y la velocidad del movimiento relativo entre las dos superficies.

Entonces, la idea sería modelizar las interfases en cuestión como del tipo “*stick*” a partir de los resultados obtenibles en ensayos característicos de las superficies a analizarse.

Resuelta conceptualmente la consideración estructural en líneas generales, con las limitaciones en los alcances ya aclaradas, en los capítulos venideros la tarea a desarrollarse será guiar el caso en estudio en base a valores obtenibles mediante ensayos de corte directo de S_{max} y K (este último, en rigor, estimable directamente a partir de S_{max} y TD).

Referencias

AL-QADI, I.L., WANG, H., “Prediction of tire pavement contact stress and analysis of asphalt pavement response: a decoupled approach”, Proceedings Asphalt Pavement Technology, Tampa, Florida, 27-30 March, Association of Asphalt Paving Technologists, pp 289-315, EEUU, 2011.

BONFIM, V., “Fresado de pavimentos asfálticos”, Editorial Exceção, primera edición, Brasil, 2008.

BROWN, S.F., BRUNTON, J.M., “The influence of bonding between bituminous layers”, Highways Transportation, 31(5), 16-17, EEUU, 1984.

CANESTRARI, F., SANTAGATA, E., “Temperature effect on the shear behavior of tack coat emulsions used in flexible pavements”, International Journal of Pavement Engineering, vol. 6, no. 1, pp. 39-46, Marcha, EEUU, 2005.

D’ANDREA, A., TOZZO, C., “Investigation of possible improvements strength in asphalt pavements”, TRB 92nd Annual Meeting Compendium of Papers, Report Numbers 13-3020, EEUU, 2013.

D’ANDREA, A., TOZZO, C., BOSCHETTO, A., BOTTINI, L., “Interphase roughness parameters and shear strength”, Modern Applied Science (ISSN 1913-1844), Canadian Center of Science and Education, vol 7, n 10, Canadá, 2013.

DE BONDT, A.H., “Anti-reflective cracking design of (reinforced) asphaltic overlays”, Tesis Doctoral, Technische Universiteit Delft, Países Bajos, 1999.

DELBONO, H.L., “Estudio de Grillas Poliméricas en Sistemas Anti-reflejo de Fisuras bajo Solicitaciones Dinámicas”, Tesis Doctoral en Ingeniería mención Materiales,

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (inédita), 379 p. La Plata, Argentina, 2014.

DNV, "Pliego de especificaciones técnicas generales para riegos de liga con emulsiones asfálticas", Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_8.pdf]

EICAM, "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93", Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.

GIOVANON, O., BUONO, F., "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.

GIOVANON, O., PAGOLA, M., "Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles desarrollado en Argentina", Revista Carreteras, Asociación Argentina de Carreteras, número 208, diciembre, pp 76-86, Argentina, 2012.

HAKIMZADEH, S., KEBEDEM, N.A., BUTTLAR, W.G., AHMED, S., EXLINE, M., "Development obased interface bond test for asphalt concrete", Road Materials and Pavement Design, vol 13, suppl. 1, 87th Association of Asphalt Pavement Technologists, 1-4 April, Taylor and Francis, EEUU, 2012.

HORAK, E., MAINA, J., EMERY, S., "A case study: quantification and modeling of asphalt overlay delamination on an airport pavement", Proceedings Eight International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Urbana-Champaign, 29 June – 2 July, pp 1475-1483, EEUU, 2009.

HUANG, Y.H., "Pavement analysis and design", Second Edition, University of Kentucky, Pearson Prentice (ISBN 0-13-142473-4), EEUU, 2004.

MOHAMMAD, L.N., BAE, A., ELSEFI, M.A., BUTTON, J., SCHEROCMAN, J.A., "Interface shear strength characterization of emulsified tack coats", Proceedings Asphalt Pavement Technology, Minneapolis, 15-18 March, Association of Asphalt Pavement Technologists, vol 78, pp. 250-277, EEUU, 2009.

MUENCH, S.T., MOOMAW, T., "De-Bonding of Hot Mix Asphalt Pavements in Washington State: An Initial Investigation", TNW 2008-10, Transportation Northwest (TransNow), University of Washington, EEUU, 2008.

NCHRP, "Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures", National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.

PMAM, "Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs", Pavement Maintenance and Advanced Materials, University of Utah, EEUU, 2013. [Consultado en web marzo de 2017: [pavaintenance.wikispaces.com/2013-Bond+Strength+by+Tom](http://pavmaintenance.wikispaces.com/2013-Bond+Strength+by+Tom)].

PYTEL, A., SINGER, F.L., "Resistencia de materiales, introducción a la mecánica de sólidos", Editorial Alfaomega-Oxford (ISBN 970-151-0569), 4^o Edición, Méjico, 2004.

RAAB, C., PARTL, M.N., "Interlayer shear performance: Experience with different pavement structures", 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna, Book 1, 535-545, Austria, 2004.

RAHMAN, A., AI, C., XIN, C., GAO, X., LU, I., "State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure", Journal of Adhesion Science and Technology (ISSN 169-4243), EEUU, 2016.

RICCI, L.A., "Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético", Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.

ROMANOSCHI, S.A., "Characterization of Pavement Layer Interfaces", Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU, 1999.

SHAHIN, M., KIRCHNER, K., BLACKMON, E.W., "Analysis of concrete layer slippage and its effect on pavement performance and rehabilitation design", Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, EEUU, 1987.

SHOLAR, G., PAGE, G., MUSSELMAN, J., UPSHAW, P., MOSELEY, H., "Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coats", Association of Asphalt Paving Technologists, 73, 771-801, EEUU, 2004.

SU, K., SUN, L., HACHIYA, A., MAEKAWA, R., "Analysis of shear stresses in asphalt pavements under actual measured tire-pavement contact pressure", 6th International Conference on Road And Airfield Pavement Technology, Sapporo, 20-23 July, Pavement Engineering Society (Singapore), pp. 11-18, Japón, 2008.

TAYABJI, S.D., OKAMOTO, P.A., "Thickness design of concrete resurfacing", Proceedings, 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, pp 367-379, Purdue University, EEUU, 1985.

TOSTICARELLI, J.R., "Ensayos para evaluar la adherencia entre capas asfálticas", Memorias de la XXXII Reunión del Asfalto en Tafí del Valle (Tucumán), Comisión Permanente del Asfalto, Argentina, 2002.

UZAN, J., LIVNEH, M., ESHED, Y., "Investigation of adhesion properties between asphalt concrete layers", Proc. Assoc. Asphalt Paving Technologists, St. Paul, Minn, 47, 495-521, EEUU, 1978.

WEST, R., ZHANG, J., MOORE, J., "Evaluation of bond strength between pavement layers", Report of National Center for Asphalt Technology, NCAT, EEUU, 2005.

WHITE, G., "Asphalt overlay bond strength", Australian Airports Association, Aircraft Pavement and Lighting Conference, Australia, 2015.

YAACOB, H., HAININ, M.R., SAFUAN, A., CHANG, F.L., "Information for the malaysian asphalt industry towards better pavement interlayer bonding", Sains Malaysiana, n 43, vol 3, pp 467-474, Malasia, 2014.

YODER, E.J., WITCZAK, M.W., "Principles of pavements design", John Wiley & Sons Inc., Second Edition, EEUU, 1975.

YOO, P.J., AL-QADI, I.L., ELSEFI, M.A., JANAJREH, I., "Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interfaces conditions and lateral shear forces", International Journal of Pavement Engineering, vol. 7, no. 1, pp. 73-86, EEUU, 2006.

ZHANG, N., ZHENG, N.X., CONG, Z.H., "Influencing factors on bonding layer performance effect between the ultra-thin surface", Functional Pavement Design (ISBN 978-1-138-02924-8), Proceedings of the 4° Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design, CEW 2016, Netherlands, 2016.

ZORNBERG, J., "Sistemas de pavimentos reforzados con geosintéticos", University of Texas at Austin, EEUU, 2015.

4. ANÁLISIS DEL INCREMENTO DE ÁREA EN LA INTERFASE POR FRESADO

Un aspecto de interés que surge al abordar el análisis de refuerzos asfálticos en los cuales la capa subyacente ha sido fresada, dada la textura “no lisa” generada, es el de establecer cómo se modifica el área involucrada en la interfase, respecto de lo que sería la textura “lisa”. En tal sentido, cabe señalar que al fresar se genera una superficie con algún tipo de ondulación, mayor que su componente proyectada (Montetrusque et al., 2015), según puede observarse en la Figura 4-1. Habitualmente en un proyecto, por ejemplo, la dotación de un riego de liga se establece para una superficie lisa, como la que se obtiene en la terminación de una capa recientemente ejecutada, por lo cual surgiría la necesidad de incrementar la dotación del riego de liga a aplicarse en función de ese aumento de superficie de la interfase.

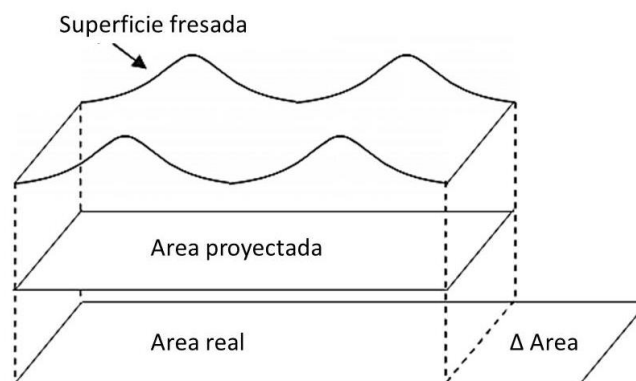


Figura 4-1. Incremento de Área por fresado
Fuente: Montetrusque et al., 2015 (traducción propia).

Ese incremento a ser aplicado en la dotación del riego de liga no debe necesariamente corresponder directamente al incremento de superficie generada por el fresado en la interfase; pues, como se explicará más adelante, existen otros parámetros que pueden tener una incidencia en ese aspecto. Ante este planteo, cabe preguntarse sobre qué base puede encararse una consideración de cómo afectar la dotación a ser aplicada. Una manera sería la de analizar cada situación en particular, ante diversos contenidos de riego de liga, establecidos en forma arbitraria o en base a criterios estimativos dados. Se podría estudiar así las respuestas obtenibles en sistemas conformados con una interfase fresada. De esta forma se arribaría, en cada caso, al incremento óptimo del riego de liga. Pero esta forma de análisis resulta prácticamente un “tanteo a ciegas”, que no permite la optimización en el empleo de los recursos disponibles y que presentaría una falencia conceptual desde el punto de vista de generación de conocimientos científico-tecnológicos.

Dado lo comentado, en la presente tesis se ha decidido dar un paso adelante. Para ello, se basa el estudio de respuesta de los sistemas con una interfase generada por fresado, en función de proporciones del incremento del área de contacto en la interfase, según se verá en capítulos venideros. Por esto, en el presente capítulo se efectúan los análisis necesarios para arribar a un conocimiento de cómo estimar ese incremento de superficie, de manera tal que se cuente con un modelo que sirva de guía en la prosecución de las tareas que se desean realizar.

4.1. Perfiles de la superficie dentada generada por el fresado

Diversas publicaciones de referencia asignan a la superficie resultante, generada por el fresado, diferentes perfiles típicos, como los que se observan en la Figura 4-2.

Allí, se ve el esquema (a) con forma de picos ondulados (The Asphalt Contractor, 2011), el esquema (b) con forma de pliegues rectos (Wirtgen, 2013), el esquema (c) con forma de ondulación (Montetrusque et al., 2015) y el esquema (d) de perfil dentado (Bussard, 2014), a manera de ejemplo.

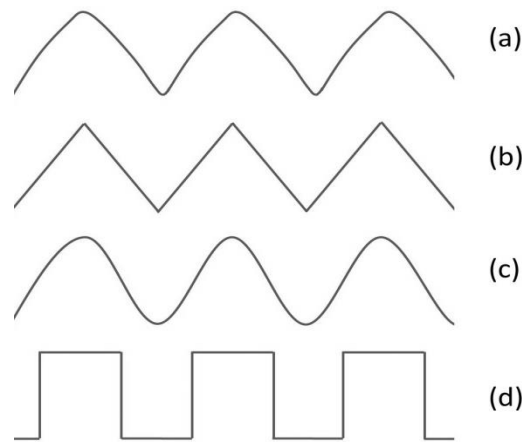


Figura 4-2. Estimaciones de perfiles de corte por fresado
Fuente: elaboración propia

Para atender a lo señalado, el equipo liderado por Montetrusque (2015) ha generado una metodología que permite establecer el incremento de área en forma geométrica. Esta metodología se basa en considerar que el perfil dentado generado presenta la forma que se observa en la Figura 4-2c, y lo asimila a la que se obtiene mediante la Ecuación 4-1, graficada en la Figura 4-3.

$$x^2 \cdot y + a^2(y - a) = 0 \tag{4-1}$$

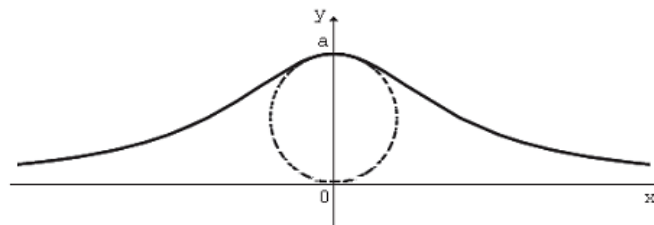


Figura 4-3. Asimilación de una superficie fresada a una curva
Fuente: Montetrusque et al., 2015

Al trabajar la Ecuación 4-1 se llega a que $x^2 \cdot y + a^2 \cdot y - a^3 = 0$ y a partir del factor común y se arriba a la expresión $y(x^2 + a^2) = a^3$, lo que permite escribir finalmente la Ecuación 4-2.

$$y = \frac{a^3}{x^2 + a^2} \tag{4-2}$$

La curva representativa de la Ecuación 4-2, puede ser obtenida de acuerdo a la Figura 4-4. En esta curva los puntos $P(x,y)$ son obtenidos mediante la intersección de dos segmentos, BP horizontal y AP vertical, perpendiculares entre sí, donde A se obtiene por la intersección de la semi-recta OA con la tangente de la curva del punto C (recta $y = a$) y B se obtiene por la intersección de la misma semi-recta con la circunferencia de diámetro $OC = a$. Haciendo variar la semi-recta OA , con el punto O fijo y la modificación del ángulo t , aparecerán nuevos puntos A_1, A_2, \dots , que por el criterio ya enunciado dan

lugar a los nuevos puntos de la curva. Los datos necesarios de campo para la aplicación del análisis son, entonces, la distancia horizontal entre dos picos de los surcos y la profundidad del surco. En la Tabla 4-1 se muestra el incremento de área generado en función de algunas combinaciones habituales, de acuerdo a los autores, de la profundidad de surcos y distancia entre ejes.

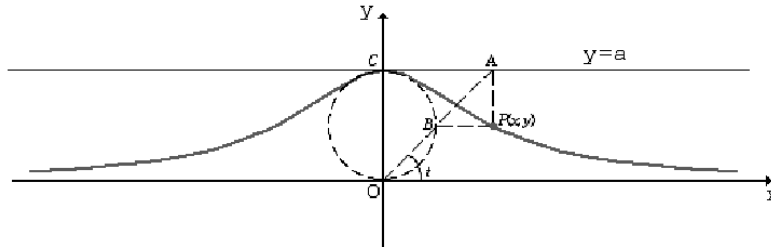


Figura 4-4. Curva representativa de la Ecuación 4-2
Fuente: Montetrusque et al., 2015

Tabla 4-1. Incremento del área ante combinaciones de d y h
Fuente: Montetrusque et al., 2015

d	h = 10 mm	h = 15 mm	h = 20 mm
Distancia (mm)	Δ área (%)	Δ área (%)	Δ área (%)
15	33	63	79
20	25	47	59
25	20	37	47
30	16	31	39
35	14	27	33
40	12	23	29

El empleo de esta metodología posee como desventaja que su aplicación se basa en la determinación de parámetros fijos de la profundidad del surco y del ancho del mismo, cuando en la práctica el fresado presenta una amplia variabilidad en tal sentido. Esto puede confirmarse al observar la Figura 4-5, constituida por las fotos en planta y perfil tomadas de un testigo extraído por calado de una superficie de pavimento asfáltico fresada.

4.2. En busca de una metodología superadora

Para salvar el inconveniente señalado de basar el método de estimación en parámetros geométricos fijos, se plantea avanzar hacia la estandarización de metodologías preliminares que, se ha relevado, existen en tal sentido. Por ejemplo, se tiene conocimiento en cuanto a que en algunos estados de Estados Unidos, como es el caso de Rhode Island, una técnica utilizada para establecer la textura de una superficie fresada, es la de desparramar una cantidad dada de microesferas de vidrio en un sector de la superficie con un palo de hockey sobre hielo y movimientos circulares. Si la superficie generada al distribuir las esferas posee menos de un determinado diámetro, entonces no se ha logrado una adecuada superficie que permita optimizar el empleo de un espesor de capa de revestimiento por resultar esta textura excesiva (The Asphalt Contractor, 2011). Experiencias similares también se llevan a cabo en China, sin existir aún una normalización en tal sentido (Zhang et al., 2016).

A partir de esta base es que pueden dirigirse los esfuerzos a la adaptación de un método de ensayo de amplia difusión en el medio vial, como es el caso del Ensayo del Parche de Arena, originalmente empleado en la determinación de la macrotextura de un pavimento. Este ensayo consiste en la distribución sobre una superficie en análisis de un volumen conocido de una arena de río de grano redondeado o microesferas de vidrio de granulometría normalizada, para lo cual se utiliza un pisón provisto de una superficie de goma (IRAM, 1997). Cuando este volumen llena los huecos superficiales se alcanza el máximo diámetro de dispersión de dicho volumen. Si se divide el volumen empleado por la superficie de distribución lograda, se obtiene como resultado del ensayo la profundidad media de los huecos rellenos por el volumen, expresada generalmente en mm, denominada *MTD* (Profundidad Media de Textura). En la Figura 4-6 se puede observar una fotografía tomada durante la realización de este ensayo sobre una probeta de laboratorio.

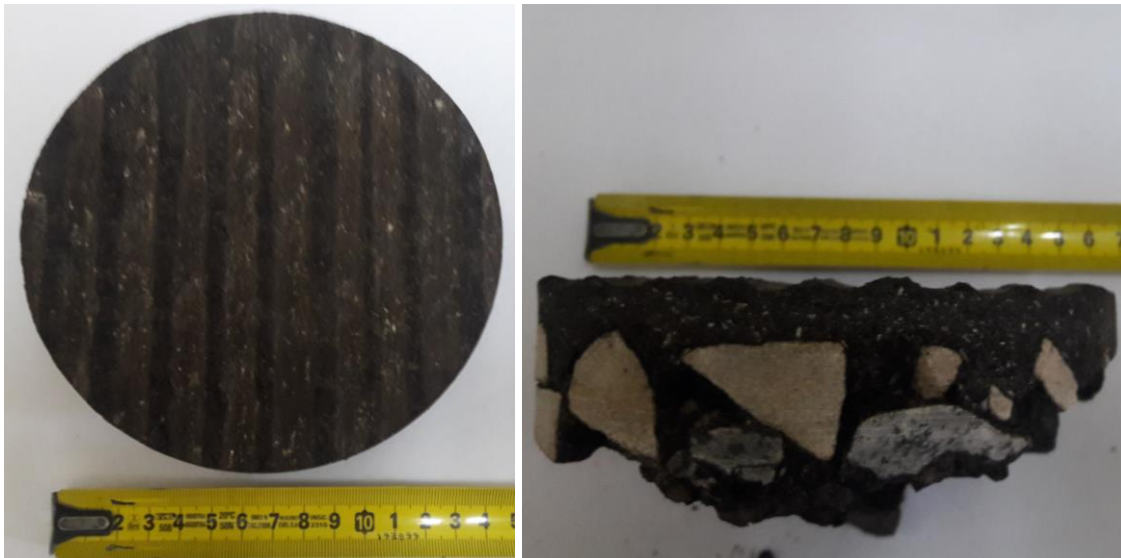


Figura 4-5. Planta y corte de un testigo extraído de un pavimento fresado
Fuente: elaboración propia

Entonces, cada textura tendrá un diámetro del Ensayo de Parche de Arena que la identifica y un $\Delta(Area)$ asociado. Si se cuenta con suficientes registros de los dos parámetros para diversas texturas de fresado, se puede intentar hallar el modelo de regresión que identifique la relación existente entre ambos. De esta manera en futuras aplicaciones podría estimarse el $\Delta(Area)$ de una textura originada por fresado, a partir de los diámetros resultantes de la aplicación del Ensayo de Parche de Arena y el modelo de regresión calculado.

Una forma de llevar adelante este análisis de determinación del $\Delta(Area)$ asociado a una textura dada (definida por la profundidad y distancia entre surcos, y su variabilidad) es mediante la aplicación de técnicas de simulación numérica. Si se plantea matemáticamente una silueta que responda a alguna de las tipologías de la Figura 4-2, se puede desarrollar un perfil fresado sobre un *plano XY*. A partir de este perfil se puede generar luego la superficie fresada a lo largo del *eje Z*, mediante la construcción de secciones transversales, con una equidistancia entre ellas igual a Δz , paralelas al *plano XY*. Estas secciones transversales permiten obtener mediante una perturbación aleatoria del perfil inicial, desarrollado anteriormente, perfiles aleatorios a lo largo del *eje Z*. Si estas perturbaciones reproducen mediante un número aleatorio entre [-1,1] las variaciones reales en campo de los parámetros que definen el perfil seleccionado, a ser analizadas oportunamente, se tiene simulada una superficie aleatoria representativa de un grado de fresado.



Figura 4-6. Realización de un Ensayo de Parche de Arena en laboratorio
Fuente: elaboración propia

El contar con esta superficie fresada, generada virtualmente, posibilita analizar la aplicación de la metodología análoga a la del Parche de Arena mediante la simulación del volcado de un volumen dado de arena fina o microsferas y su distribución al ras sobre la superficie fresada, lo que daría por resultado un círculo de radio R . Numéricamente este proceso se puede materializar al establecer el mínimo de la función $S(R)$, la cual depende únicamente del radio del círculo R , que puede definirse como se observa en la Ecuación 4-3.

$$\text{Min}_R \{S(R)\} = \text{Min}_R \left\{ (V_{\text{dato}} - V_{\text{calc}}(R))^2 \right\} \quad (4-3)$$

Donde:

V_{dato} = volumen de arena volcado
 $V_{\text{calc}}(R)$ = volumen contenido en la superficie fresada aleatoria para un radio R

Con respecto a la función $S(R)$, para definir su mínimo se puede utilizar un método de orden cero basado, por ejemplo, en la metodología de la Sección Golden, el cual establece una sucesión de puntos que convergen al mínimo de la función. Al obtener su mínimo $R = R^*$ se puede arribar a que $V_{\text{dato}} = V_{\text{calc}}(R^*)$.

Mediante la definición de casos base de simulación, en función de los resultados del relevamiento de dimensiones habituales de fresado clasificados por rangos acotados, se pueden simular una serie de superficies aleatorias, las cuales llevan en cada caso a un radio R simulado de distribución de la arena y, por lo tanto, a una “superficie mojada” dentro del círculo de la geometría fresada (S_{moj}); la cual sería mayor al área definida por el círculo de radio R . Esta “superficie mojada” será aquella a ser impregnada por el riego de liga. Luego, se puede analizar su relación por unidad de superficie afectada mediante el incremento $\Delta(\text{Area})$, calculado con la Ecuación 4-4.

$$\Delta(\text{Area}) = S_{\text{moj}} - \pi R^2 \quad (4-4)$$

Al graficar los resultados obtenidos, puede establecerse el modelo de dependencia funcional entre $\Delta(\text{Area})$ y el radio R . Esto permite en campo utilizar la metodología

análoga al Parche de Arena y contar con una base para estimar el incremento de riego de liga a aplicarse. Este último, siempre con respecto al valor de referencia para una superficie lisa (que no necesariamente es el propio incremento de superficie, dado algunos aspectos a ser analizados más adelante).

4.3. Medición de la textura superficial en probetas

Con la introducción de la tecnología de imágenes emergentes 3D por láser, el grupo de investigación de Wang (2012) estudió el potencial de la alta resolución de superficies 3D para el análisis del pavimento. En ese estudio, la textura del pavimento y la evaluación de deterioro han sido exploradas con un sistema de sensores 3D de alta velocidad, en vistas a modelizar las características del pavimento. Ellos hallaron una correlación útil y cuantitativa entre los resultados de indicadores de textura y las diferentes texturas superficiales. Varios investigadores, en cambio, analizaron el uso del dispositivo de medición de macrotextura en caminos mediante un láser inercial. Finalmente, vale la pena citar que existen experiencias en las que se emplearon mediciones de contraste, energía de correlación y homogeneidad, también como vías de obtención de parámetros que permitan caracterizar las diferentes texturas superficiales, (D'Andrea et al., 2013).

En base a esas experiencias, D'Andrea (2013) y su grupo de trabajo, utilizaron un escáner laser NextEngine 3D para adquirir las coordenadas absolutas de las superficies generadas sobre un pavimento asfáltico. Este escáner trabaja con el principio de triangulación; el láser genera un barrido a través del objeto, que es focalizado por medio de lentes de la cámara digital (CCD de su sigla en inglés). Posee una precisión de 0,1 mm, más que suficiente para caracterizar la superficie asfáltica de acuerdo al tamaño de sus gránulos. Las fases de proceso y análisis se realizaron con un programa de computación matemático. Obtuvieron así los vértices, filtrados por medias del plano de regresión para eliminar errores de posicionamiento. A partir de estos calcularon diferentes parámetros de la textura en el entorno del plano de regresión. Las imágenes de la Figura 4-7 corresponden a estas experiencias.

Como puede observarse, la precisión lograda por esta vía es marcadamente superior a la necesaria para el presente estudio, ya que para la mayor escala de valores implicados en el fresado de una superficie, la precisión visual en las mediciones se considera aceptable, máxime si esta visualización puede realizarse con imágenes digitales ampliadas en el monitor de una PC a una escala conveniente.

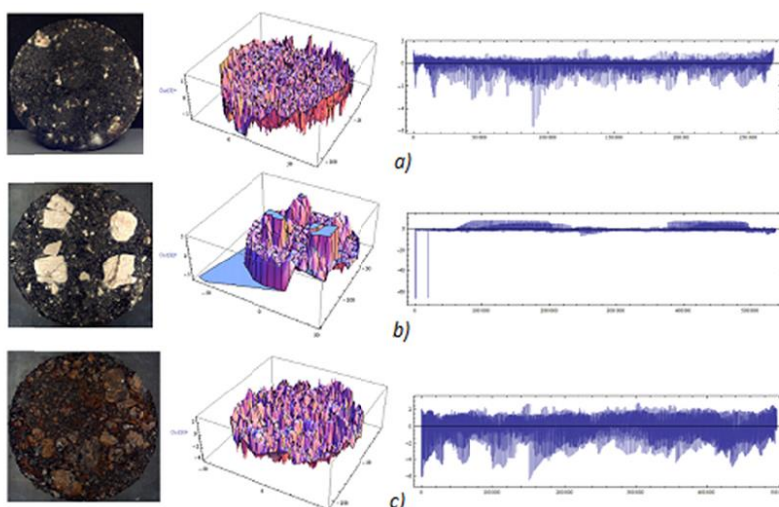


Figura 4-7. Imágenes de texturas de pavimentos obtenida por escaner 3D
Fuente: D'Andrea et al., 2013

Por lo expuesto, se decide realizar los análisis en cuanto a las texturas generadas por el fresado, mediante visualización con una escala de referencia, de imágenes digitales ampliadas. Estas imágenes digitales pueden lograrse mediante el escaneo de secciones de probetas. En la Figura 4-8 se observa el ejemplo de una imagen obtenida por esta vía mediante un escáner Epson Stylus CX9300F. En la misma se ve la aplicación de lo citado sobre una sección generada mediante el aserrado de una probeta asfáltica no fresada, a la cual se la ha pintado de blanco y se le ha colocado un elemento reglado para posibilitar el escalado de la observación.

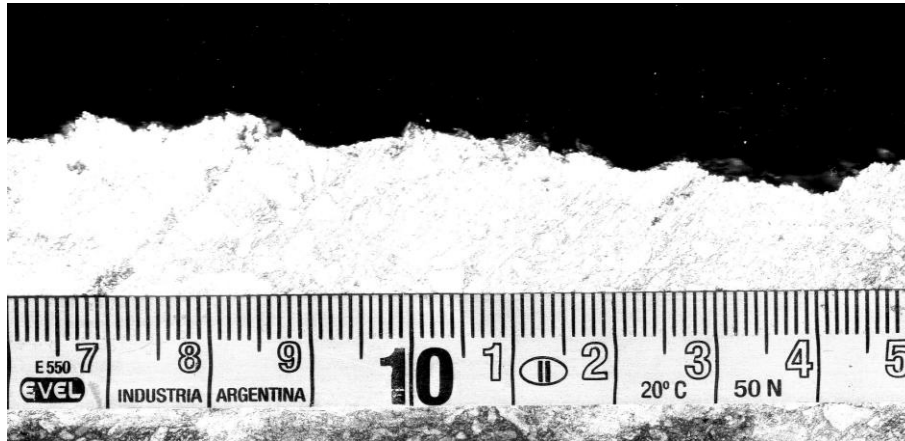


Figura 4-8. Escaneo de una sección de una probeta asfáltica
Fuente: elaboración propia

4.4. Aplicación a modelos de superficie de acuerdo al perfil fresado tipo “d”

De los tipos de perfiles relevados se ha decidido avanzar en los estudios con el denominado tipo “d” (Figura 4-2d), dado que se ve como una solución de compromiso entre el perfil real de fresado en campo, el perfil de adecuada resolución matemática para su simulación numérica y el perfil obtenible por simulación por aserrado en laboratorio. Más adelante en este documento se volcarán criterios adicionales en tal sentido.

La simulación numérica de este perfil requiere que el mismo sea planteado por medio de parámetros geométricos. Para ello se definen el ancho superior del diente (h_1), la altura del diente (h_3) y la separación entre surcos (h_2). Se puede desarrollar así el perfil de fresado sobre el *plano XY* graficado en la Figura 4-9.

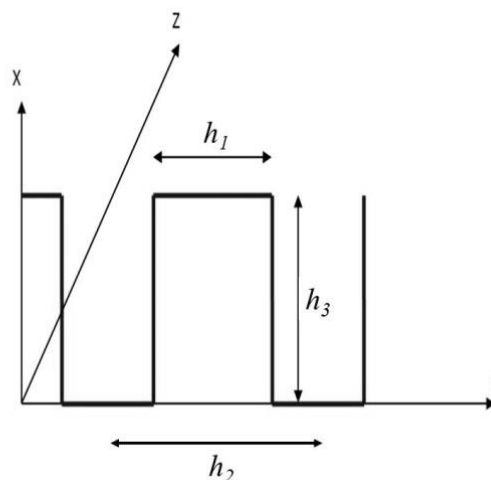


Figura 4-9. Perfil de simulación en el *plano XY*
Fuente: elaboración propia

Cuando se fresa, estos parámetros presentan un grado de variabilidad, la cual se evalúa al extraer testigos luego de haberse realizado esta operación en dos obras de pavimentación urbana en la ciudad de La Plata. En la Figura 4-10 se puede observar el equipo de fresado empleado en la Obra A y en la Figura 4-11 una imagen comercial del equipo empleado en la Obra B.



Figura 4-10. Equipo de fresado empleado en la Obra A en estudio
Fuente: elaboración propia



Figura 4-11. Tipo de equipo de fresado empleado en la Obra B en estudio
Fuente: www.specsandbrochures.com

En la Figura 4-12 se observan los testigos representativos extraídos de dichas obras. Como se ve, a los testigos se les ha practicado una base de yeso para lograr el paralelismo de sus caras. A la derecha se observa el Testigo A y a la izquierda el Testigo B, correspondientes a la Obra A y B respectivamente. Luego, se procede a su aserrado con hoja diamantada cada aproximadamente 1,0 cm de profundidad (Figura 4-13). Así se logran las secciones de análisis de la Figura 4-14.

A las secciones en estudio logradas con la técnica señalada, se les practica un escaneo de precisión con un escáner Epson Stylus CX9300F. A las imágenes así generadas se les aplica por medio del programa computacional MatLab, un reglado

cada 1 mm en sentido horizontal y vertical. Finalmente, se obtienen las imágenes que se observan de la Figura 4-15 a la Figura 4-29.



Figura 4-12. Testigos acondicionados
Fuente: elaboración propia



Figura 4-13. Aserrado de testigos
Fuente: elaboración propia



Figura 4-14. Secciones por aserrado logradas en el Testigo B
Fuente: elaboración propia

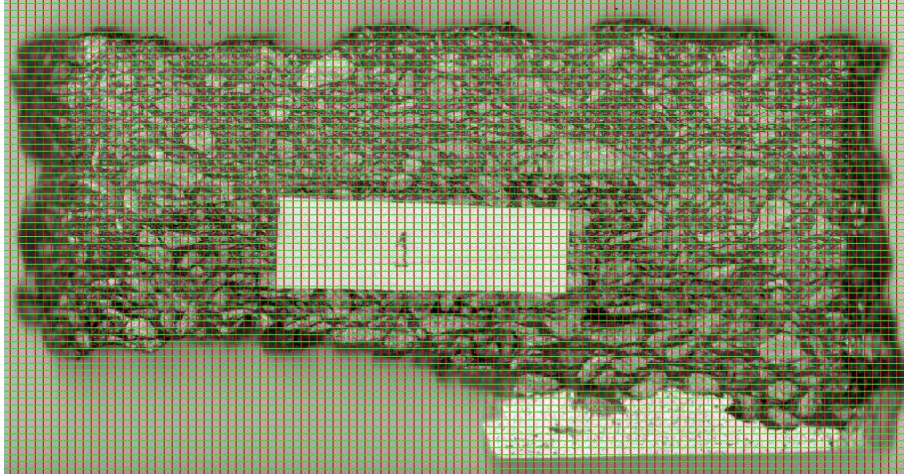


Figura 4-15. Sección de análisis 1, Testigo A
Fuente: elaboración propia

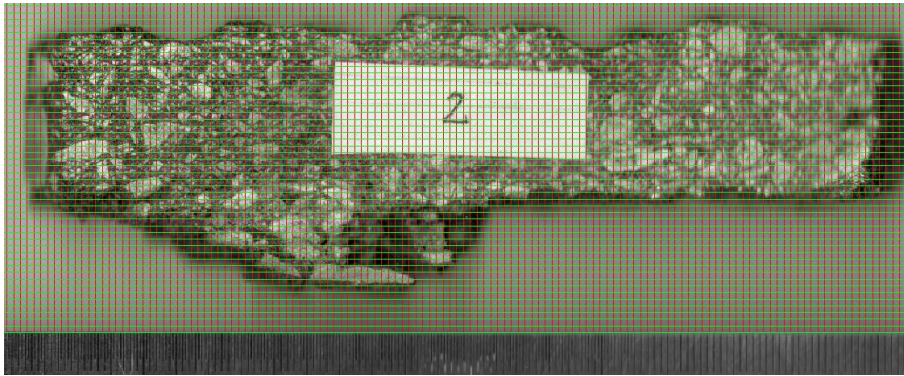


Figura 4-16. Sección de análisis 2, Testigo A
Fuente: elaboración propia

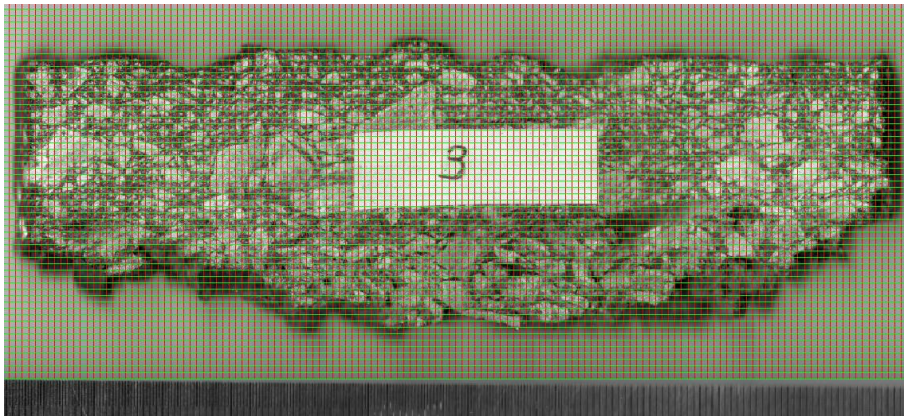


Figura 4-17. Sección de análisis 3, Testigo A
Fuente: elaboración propia

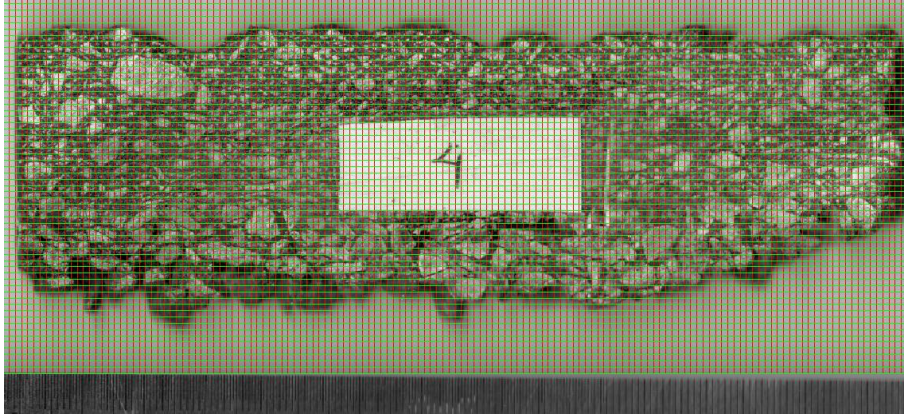


Figura 4-18. Sección de análisis 4, Testigo A
Fuente: elaboración propia

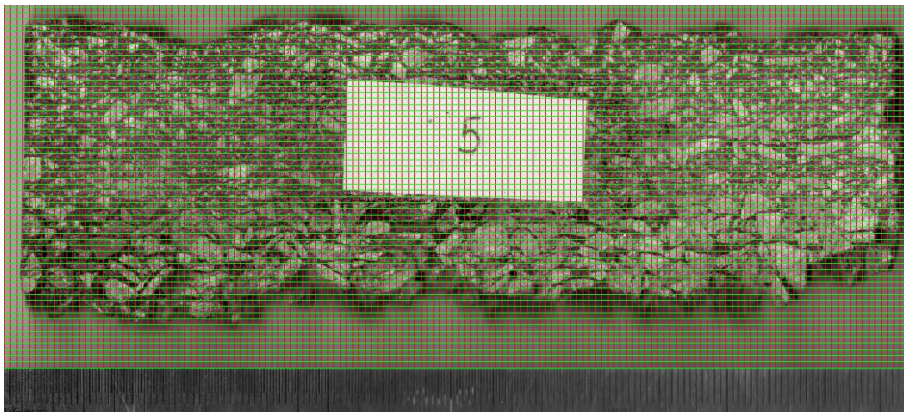


Figura 4-19. Sección de análisis 5, Testigo A
Fuente: elaboración propia

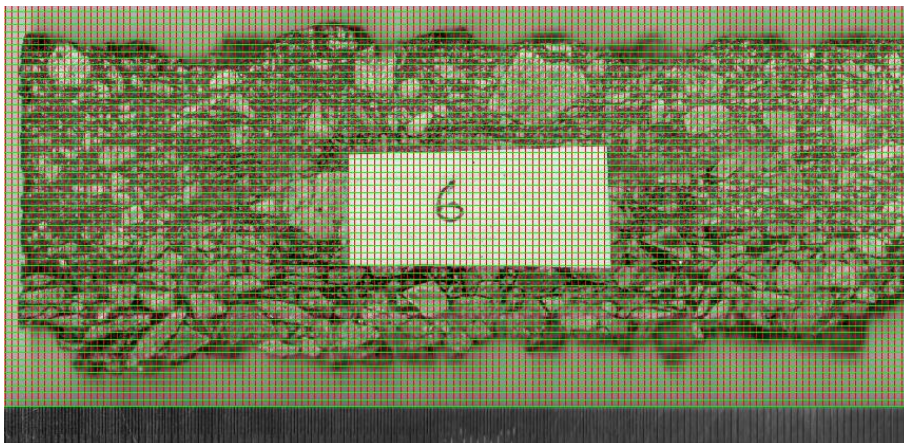


Figura 4-20. Sección de análisis 6, Testigo A
Fuente: elaboración propia

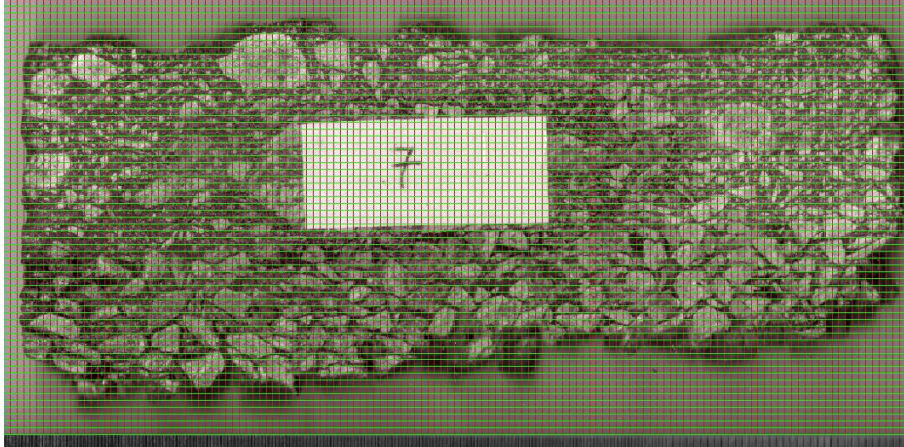


Figura 4-21. Sección de análisis 7, Testigo A
Fuente: elaboración propia

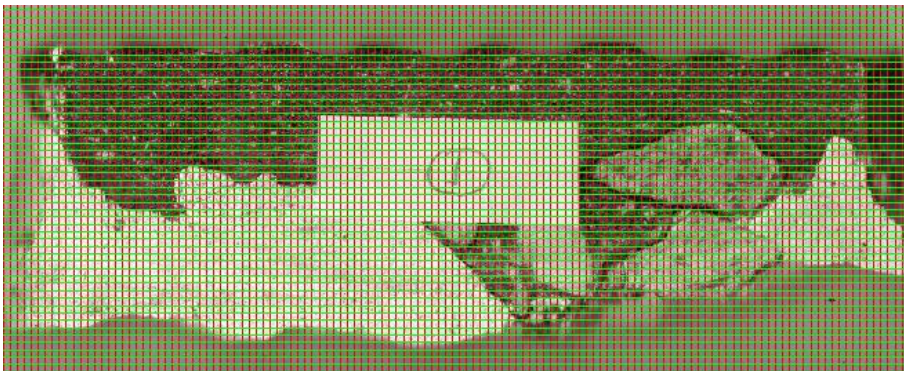


Figura 4-22. Sección de análisis 1, Testigo B
Fuente: elaboración propia

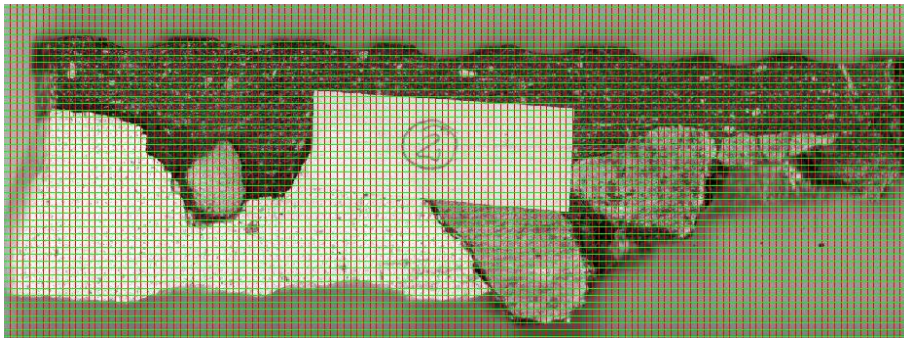


Figura 4-23. Sección de análisis 2, Testigo B
Fuente: elaboración propia



Figura 4-24. Sección de análisis 3, Testigo B
Fuente: elaboración propia

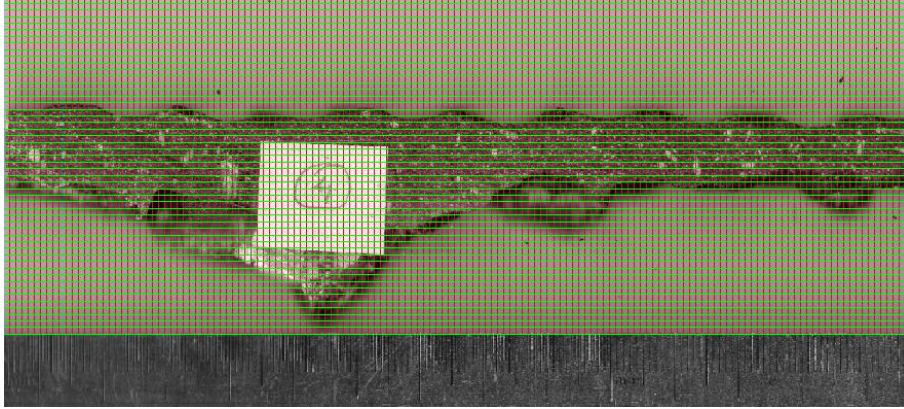


Figura 4-25. Sección de análisis 4, Testigo B
Fuente: elaboración propia

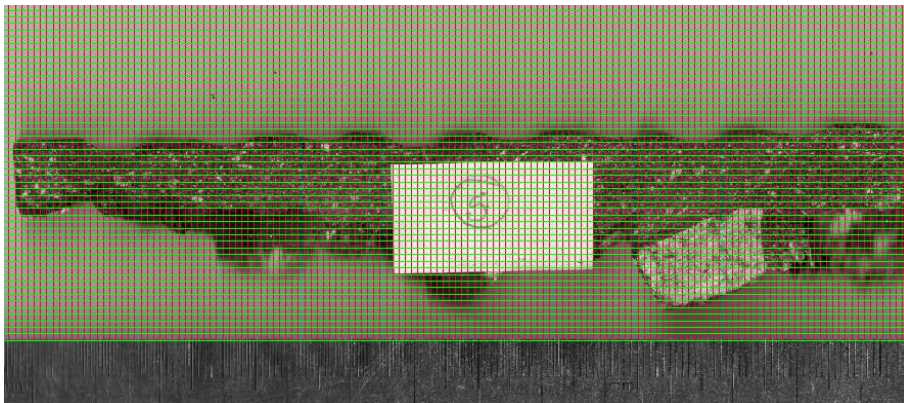


Figura 4-26. Sección de análisis 5, Testigo B
Fuente: elaboración propia

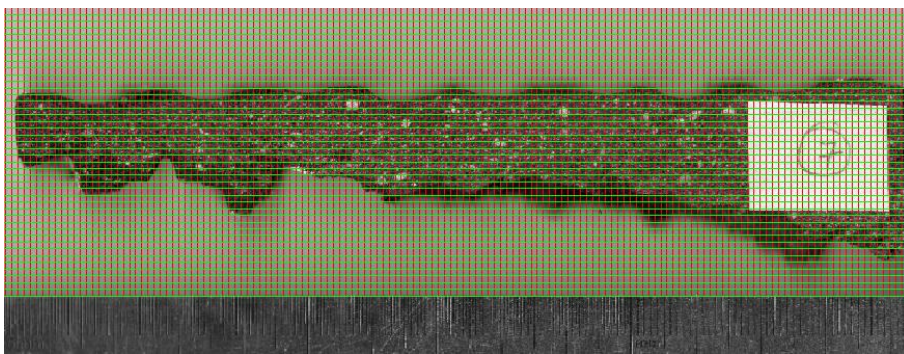


Figura 4-27. Sección de análisis 7, Testigo B
Fuente: elaboración propia

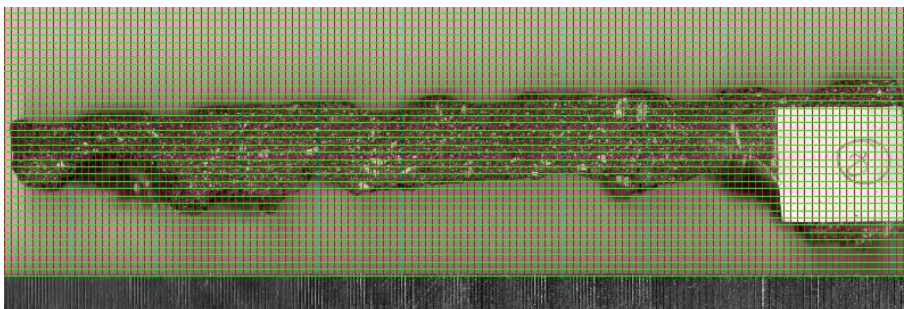


Figura 4-28. Sección de análisis 8, Testigo B
Fuente: elaboración propia

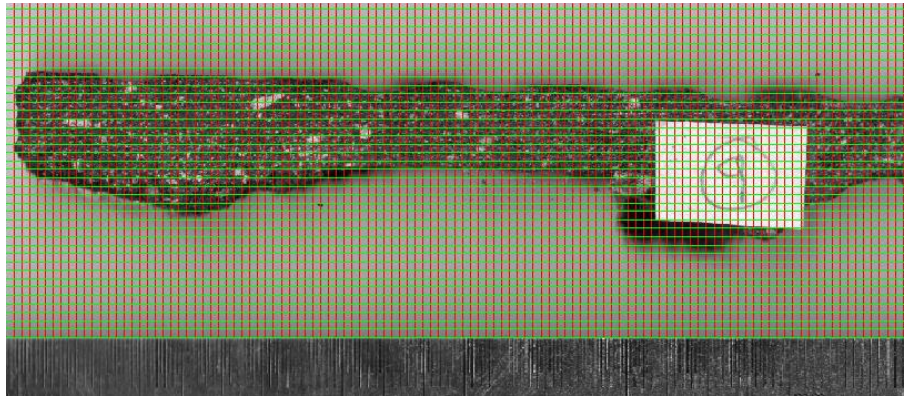


Figura 4-29. Sección de análisis 9, Testigo B

Fuente: elaboración propia

A partir de estas imágenes se realizan las mediciones de los parámetros que definen el perfil de fresado, lo que permite confeccionar la Tabla 4-2 para el Testigo A y el Testigo B.

Tabla 4-2. Mediciones realizadas sobre los testigos

Fuente: elaboración propia

Testigo A									Testigo B								
h_1 [mm]			h_2 [mm]			h_3 [mm]			h_1 [mm]			h_2 [mm]			h_3 [mm]		
3	4	5	16	16	15	2	2	3	7	6	6	15	16	15	2	2	2
6	5	4	15	14	15	3	4	1	7	6	7	17	15	15	1	2	1
6	4	6	14	17	16	4	3	3	5	5	7	13	13	17	1	2	1
6	6	5	15	13	15	2	2	2	6	5	6	16	17	14	2	2	2
7	5	5	17	16	17	4	3	2	8	6	5	16	16	15	1	2	2
5	5	4	13	15	16	3	2	2	8	7	9	16	16		1	2	2
4	3	7	16	14	16	3	2	1	8	7	3	15	15		3	3	3
5	5	5	14	13		3	4		4	3	4	14	18		1	1	2
7	4	4	13	14		1	1		8	3	5	17	17		1	1	2
7	3	4	17	15		3	2		5	8	10	13	17		2	2	
6	4	6	15	15		2	3		4	3	8	15	14		2	2	
6	4		13	16		4	2		8	4	8	18	15		2	2	
5	4		16	15		2	3		7	5	7	17	18		2	1	
7	5		12	14		2	2		6	8	8	15	12		1	3	
5	3		18	16		2	1		8	6	6	15	17		2	1	
7	4		15	14		4	2		8	5	5	18	18		1	2	
5	4		13	16		2	3		3	7		13	15		1	2	
5	4		16	15		3	1		9	7		16	14		3	2	
6	3		16	15		3	3		5	6		17	17		2	2	
6	2		13	17		3	2		6	5		16	16		2	2	
4	4		16	15		1	3		8	7		15	12		1	1	
4	3		14	14		2	2		7	3		15	16		2	3	
5	5		13	17		1	1		7	5		16	17		1	1	
3	5		16	13		2	1		7	8		13	17		2	2	

Las estadísticas que se obtienen con los datos presentados pueden observarse en la Tabla 4-3.

Estas estadísticas son útiles a diversos efectos. Uno de estos es el de encontrar la distribución probabilística que mejor ajuste al conjunto de datos con el que se cuenta.

Si bien puede establecerse por el Teorema Central del Límite que el comportamiento de las variables aleatorias naturales, cuando crece el número de sumandos, asegura su convergencia hacia una distribución normal en condiciones muy generales, eso debe corroborarse. Esto se debe a que lo expresado se cumple para muestras de 10.000 individuos para arriba (Alvarado y Batanero, 2008), lo cual no se da en el caso en análisis. En tal sentido, vale señalar que la distribución normal, o de Gauss, es la más ampliamente utilizada en experimentos de la tipología del abordado (Judge, 1999). Dicha distribución posee la función de densidad que se observa en la Ecuación 4-5, y es descripta por su media μ y su desvío estándar σ , según se observa en la Figura 4-30.

Tabla 4-3. Resumen estadístico de las mediciones sobre testigos
Fuente: elaboración propia

Estadístico	Testigo A			Testigo B		
	h_1	h_2	h_3	h_1	h_2	h_3
Media [mm]	4,80	15,00	2,35	6,22	15,57	1,77
Error típico [mm]	0,16	0,19	0,12	0,21	0,22	0,08
Mediana [mm]	5	15	2	6	16	2
Moda [mm]	5	16	2	7	15	2
Desviación estándar [mm]	1,21	1,37	0,91	1,70	1,58	0,63
Varianza [mm]	1,48	1,89	0,82	2,90	2,48	0,39
Curtosis tipificada	-0,78	-1,06	-1,05	-0,96	-0,60	-0,83
Asimetría tipificada	0,33	-0,40	0,52	-0,89	-1,29	0,64
Rango [mm]	5	6	3	7	6	2
Mínimo [mm]	2	12	1	3	12	1
Máximo [mm]	7	18	4	10	18	3
Cuenta [ud]	59	55	55	64	53	57
Coefficiente de variación [%]	25,3	9,2	38,7	27,4	10,1	35,4

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{1}{2\sigma^2}\right)(x - \mu)^2\right] \quad (4-5)$$

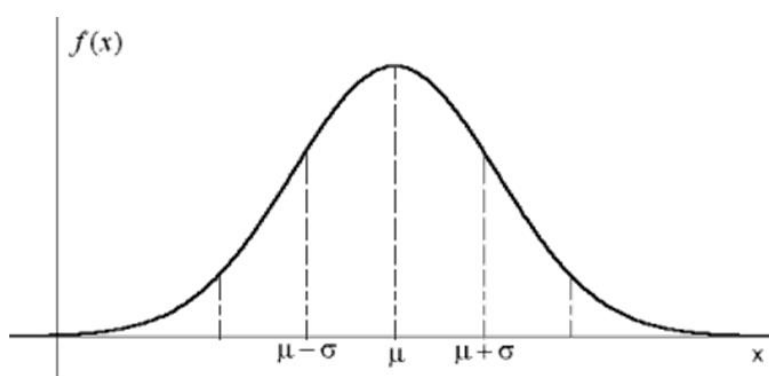


Figura 4-30. Gráfica de una distribución normal
Fuente: Judge, 1999

La Tabla 4-3 muestra el resumen estadístico para la muestra analizada. Se destacan las medias y los desvíos estándar de las muestras. Además, resulta de interés analizar las asimetrías y las curtosis tipificadas, las cuales, por presentar valores en el rango de $|2|$, dan indicios de un ajuste estadísticamente aceptable para la distribución normal (Statgraphics, 2000).

La teoría de la probabilidad y la estadística indica que la curtosis es una medida que sirve para analizar el grado de concentración que presentan los valores de una variable analizada alrededor de su zona central de distribución de frecuencias, sin la necesidad de generar el gráfico correspondiente. Si se toma a la normal como referencia, una distribución puede ser leptocúrtica cuando es más apuntada y con colas menos anchas que la normal, platicúrtica cuando resulta menos apuntada y con colas más anchas que la normal, y mesocúrtica cuando tiene una distribución normal.

Por su parte, las medidas de asimetría permiten establecer el grado de simetría (o asimetría) que presenta una distribución de probabilidad de una variable aleatoria sin tener que acudir a su representación gráfica. Se define como eje de simetría a una recta que pasa por la media de la distribución en forma paralela al eje de ordenadas. Si una distribución es simétrica, existe el mismo número de valores a la derecha que a la izquierda de la media, por lo tanto, el mismo número de desviaciones con signo positivo que con signo negativo. Se dice que hay asimetría positiva (o a la derecha) si la "cola" a la derecha de la media es más larga que la de la izquierda, es decir, si hay valores más separados de la media a la derecha. En cambio, se dice que hay asimetría negativa (o a la izquierda) si la "cola" a la izquierda de la media es más larga que la de la derecha, o sea, si hay valores más separados de la media a la izquierda.

Otra de las utilidades de las estadísticas obtenidas se da cuando se desea hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable. Para esto se utiliza el coeficiente de variación. Su fórmula expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, lo cual facilita el análisis del grado de variabilidad de la muestra. A mayor valor del coeficiente de variación, mayor heterogeneidad de los valores de la variable; y a menor valor, mayor homogeneidad en los valores de la variable (Cartuccia, 2009).

Cabe señalar, de lo expresado en la Tabla 4-3, que los resultados de los coeficientes de variación, por resultar suficientemente coincidentes, pueden ser finalmente promediados, como se observa en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Dispersiones de la media en parámetros del perfil de fresado y Relación h_1/h_2 entre medias
Fuente: elaboración propia

Caso	Coeficientes de Variación			Relación h_1/h_2
	h_1	h_2	h_3	
Testigo A	25,3%	9,2%	38,7%	32,0%
Testigo B	27,4%	10,1%	35,4%	40,0%
Promedios	26,4%	9,6%	37,0%	36,0%

Como puede observarse en la Tabla 4-4, la variabilidad promedio de las distancias entre surcos h_2 es marcadamente menor que las de h_1 y h_3 , lo cual guardaría relación con el hecho de que en la práctica los equipos de fresado deben tener sus herramientas de desbaste separadas una distancia constante. Por lo mencionado se decide en las simulaciones a realizarse establecer a este parámetro como fijo.

Finalmente, se arriba a la Tabla 4-5, donde se observan los casos a ser simulados matemáticamente, definidos por sus medias μ (para h_2 y h_3 adoptadas de los valores volcados en la Tabla 2-2 y para h_1 calculadas a partir de la relación h_1/h_2 promedio de la Tabla 4-4) y su desvío estándar σ (calculado para h_1 y h_3 a partir de los coeficientes de variación promedios de la Tabla 4-4).

Tabla 4-5. Casos de simulación y sus dispersiones
Fuente: elaboración propia

Caso	h_1		h_2	h_3	
	μ (mm)	σ (mm)	μ (mm)	μ (mm)	σ (mm)
1	2,9	0,8	8,0	1,0	0,4
2	4,1	1,1	11,4	2,4	0,9
3	5,3	1,4	14,8	3,8	1,4
4	6,5	1,7	18,2	5,2	1,9
5	7,8	2,0	21,6	6,6	2,4
6	9,0	2,4	25,0	8,0	3,0

A continuación, para establecer el volumen de arena a ser considerado para el ensayo en desarrollo, se procede a generar una rutina de análisis mediante el programa MatLab, basada en hallar el mínimo en la Ecuación 4-3. Se utiliza para ello una metodología de los números de Fibonacci, sin necesidad de calcular derivadas (método de orden 0). Mediante dicha rutina se calculan los diámetros obtenibles de la aplicación del Ensayo de Parche de Arena, dado un volumen de arena supuesto. Se analizan volúmenes crecientes cada 5 cm³ desde 20 cm³ hasta 75 cm³, en los casos de análisis tomados a partir de las medias μ de la Tabla 4-5, sin aplicar aún la dispersión σ . Se arriba así, a que el volumen de ensayo óptimo es de 40 cm³, pues llevaría a la obtención de Parches de Arena en su aplicación con diámetros del entorno de entre 10 cm a 30 cm, tal cual puede observarse en la Tabla 4-6. Estos diámetros resultan en dimensiones prácticas para su aplicación en obra. En el Anexo C se vuelca la rutina generada a tal efecto, identificada como Rutina 1.

Tabla 4-6. Diámetros de ensayo para distintos volúmenes de arena
Fuente: elaboración propia

Volumen (cm ³)	Diámetros (cm)					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
20	20,0	13,0	10,4	8,9	7,9	7,4
25	22,3	14,5	11,5	10,0	8,7	8,2
30	24,5	15,8	12,6	10,7	9,7	9,0
35	26,5	17,1	13,6	11,7	10,5	9,4
40	28,3	18,2	14,5	12,5	11,2	10,0
45	30,0	19,4	15,4	13,3	11,9	10,7
50	31,6	20,4	16,3	13,9	12,3	11,4
55	33,2	21,4	17,1	14,5	12,9	12,0
60	34,6	22,4	17,7	15,2	13,6	12,5
65	36,1	23,2	18,5	15,9	14,2	13,0
70	37,4	24,1	19,2	16,5	14,7	13,5
75	38,7	24,9	19,9	17,1	15,3	13,9

Una vez establecido el volumen a ser empleado en el análisis, se procede a la simulación de los casos a partir de las medias μ y dispersiones σ de la Tabla 4-5. Para ello se desarrolla una nueva rutina con el programa MatLab, la cual genera secciones transversales aleatorias en función de las variaciones impuestas, que son luego usadas en el cálculo de las superficies y los volúmenes implicados. En el cálculo se aplica la regla de integración numérica del trapecio, con una distancia entre secciones transversales de 1,0 mm. Se generan por simulación 10 superficies aleatorias para

cada uno de los 6 casos. En el Anexo C se vuelca la rutina desarrollada, identificada como Rutina 2.

Los resultados mediante la aplicación de esta rutina se pueden observar en la Tabla 4-7. En ésta se ve bajo el título de “Caso Origen” al caso de fresado utilizado como base mediante su valor medio y su dispersión en la simulación, de “Área Plana” a la superficie en el plano de proyección correspondiente al diámetro obtenido por simulación, de “Área Fresada” a la superficie total generada por el fresado para el diámetro obtenido por simulación, de “Coeficiente de Incremento de Área” a la relación numérica entre ambas superficies, y de “Diámetro del Parche de Arena” al diámetro obtenido por simulación.

Mediante estos datos, puede confeccionarse la gráfica del Coeficiente de Incremento de Area versus el Diámetro del Parche de Arena, que se observa en la Figura 4-31.

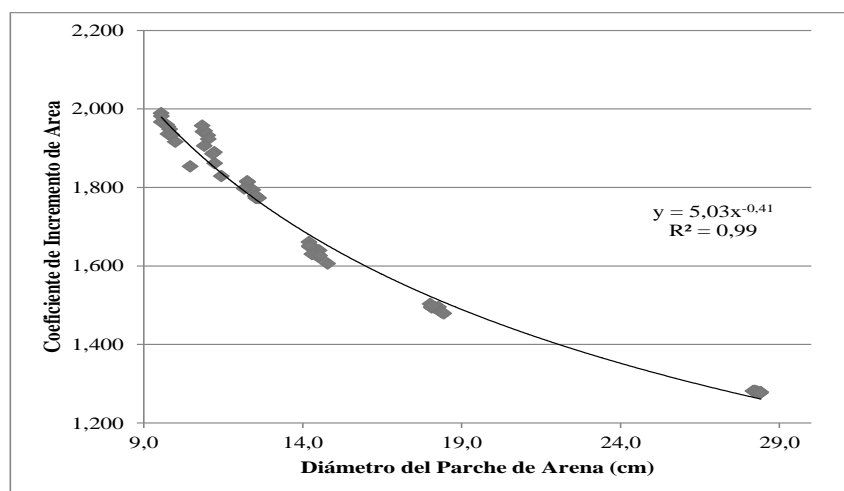


Figura 4-31. Coef. de Incremento de Area versus Diámetro del Parche de Arena
Fuente: elaboración propia

El coeficiente de determinación R^2 es un estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis. Este coeficiente determina con qué calidad un modelo replica los resultados y la proporción de variación de los mismos que puede explicarse por el modelo. Éste se calcula como el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Puede tener valores entre 0 (ninguna relación) y 1 (relación perfecta).

Como se observa en la Figura 4-31, se puede ajustar por regresión a la nube de puntos una función del tipo potencial, la cual permite obtener un coeficiente de determinación R^2 de 0,99, acorde al umbral empírico generalmente establecido para estudios de esta índole de 0,90 (Bello, 2016).

La fórmula que permite establecer el Coeficiente del Incremento del Area (CIA) en función del Diámetro del Parche de Arena (DPA), resultante para un volumen de arena de 40 cm^3 y al tomar como válido el perfil dentado de la Figura 4-2d, es la que se observa en la Ecuación 4-6.

$$CIA = 5,03 DPA^{-0,41} \quad (4-6)$$

Tabla 4-7. Resultados obtenidos en las simulaciones
Fuente: elaboración propia

Caso Origen	Area Plana (cm ²)	Area Fresado (cm ²)	Coefficiente de Incremento de Area	Diámetro del Parche de Arena (cm)
1	623,3	798,6	1,281	28,2
1	632,5	807,0	1,276	28,4
1	633,3	809,7	1,278	28,4
1	627,2	803,3	1,281	28,3
1	634,0	810,5	1,278	28,4
1	628,7	804,5	1,280	28,3
1	628,6	803,8	1,279	28,3
1	625,6	802,0	1,282	28,2
1	629,6	805,5	1,279	28,3
1	633,8	809,4	1,277	28,4
2	259,5	387,2	1,492	18,2
2	262,2	392,0	1,495	18,3
2	256,3	383,1	1,495	18,1
2	256,3	383,3	1,495	18,1
2	259,7	388,0	1,494	18,2
2	254,7	383,0	1,503	18,0
2	265,0	392,7	1,482	18,4
2	255,8	382,4	1,495	18,0
2	256,5	384,2	1,498	18,1
2	267,1	395,1	1,479	18,4
3	158,4	263,1	1,661	14,2
3	158,9	261,9	1,649	14,2
3	165,6	271,6	1,640	14,5
3	163,2	268,1	1,643	14,4
3	158,6	261,9	1,651	14,2
3	165,3	268,2	1,623	14,5
3	164,1	267,9	1,632	14,5
3	160,5	261,7	1,630	14,3
3	165,9	269,8	1,626	14,5
3	171,7	275,8	1,606	14,8
4	123,4	218,7	1,773	12,5
4	118,4	214,7	1,814	12,3
4	118,0	214,2	1,816	12,3
4	123,9	220,1	1,776	12,6
4	123,6	219,2	1,773	12,5
4	123,0	218,7	1,778	12,5
4	121,4	217,7	1,794	12,4
4	125,0	221,7	1,773	12,6
4	123,2	219,1	1,779	12,5
4	116,2	208,8	1,797	12,2
5	95,2	184,1	1,933	11,0
5	99,0	184,4	1,862	11,2
5	98,9	186,9	1,890	11,2
5	95,6	183,9	1,923	11,0
5	92,7	180,1	1,942	10,9
5	93,5	178,2	1,906	10,9
5	93,6	181,9	1,944	10,9
5	97,9	184,5	1,886	11,2
5	102,9	188,2	1,829	11,4
5	92,2	180,5	1,957	10,8
5	86,0	159,3	1,854	10,5
6	74,9	145,0	1,936	9,8
6	74,2	145,4	1,959	9,7
6	76,7	148,3	1,934	9,9
6	71,7	142,6	1,989	9,6
6	75,6	147,4	1,948	9,8
6	71,7	141,0	1,967	9,6
6	74,8	146,3	1,955	9,8
6	71,8	142,2	1,982	9,6
6	78,4	150,2	1,916	10,0

4.5. Corroboración práctica del modelo obtenido

A continuación se corrobora el modelo desarrollado. Para ello se analiza la existencia de una correlación entre los resultados obtenidos en forma teórica por simulación y los obtenibles en la práctica, al menos sobre probetas en laboratorio. Para ello, se materializan probetas representativas de los 6 casos de fresado en análisis que fueron volcados en la Tabla 4-5, se aplica sobre las mismas la técnica de medición planteada análoga a la del Ensayo de Parche de Arena y se comparan los Diámetros del Parche de Arena obtenidos mediante esta técnica con los correspondientes a las simulaciones numéricas efectuadas.

En la confección de las probetas en laboratorio se utiliza el equipo de compactación denominado *Roller Compact*, empleado comúnmente en el moldeo de las probetas de 30 cm x 30 cm x 5 cm ensayadas mediante el equipo de *Wheel Tracking Test*. Con este equipo se moldean las 6 probetas necesarias, para lo cual se utiliza una mezcla asfáltica del tipo Concreto Asfáltico en Caliente Denso con Tamaño Máximo de 19 mm (CAC-D19), de acuerdo a la nomenclatura empleada en el “Proyecto de pliego de especificaciones técnicas generales para mezclas asfálticas en caliente gruesas” de la Comisión Permanente del Asfalto (CPA, 2015) y el “Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos” de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 2017). En capítulos subsiguientes se dará una descripción completa de la tipología de mezcla asfáltica utilizada. En la Figura 4-32 se observan imágenes tomadas durante el moldeo de probetas con el equipo *Roller Compact*.



Figura 4-32. Moldeo de probetas con *Roller Compact*
Fuente: elaboración propia

Con relación a la simulación del fresado en obra se resuelve emplear un equipo de aserrado con hoja diamantada, que cuenta con los respectivos elementos de guía para posibilitar la realización de los cortes necesarios en forma paralela y con una profundidad controlada. Para ello se marcan en las probetas las secciones de corte y se procede a su aserrado, según puede apreciarse en la Figura 4-33 y en la Figura 4-34, aplicado sobre la probeta correspondiente al Caso 1.

En la Figura 4-35, puede verse el escaneo comparativo de dos secciones. La imagen superior proviene de un testigo extraído en obra luego del proceso de fresado. La imagen inferior proviene del escaneo de la sección generada para el Caso 3, que se identifica como el correspondiente a la situación real. Ambas imágenes se encuentran volcadas en una misma escala. Puede observarse en el análisis visual comparativo la

notable similitud lograda con la técnica de simulación del fresado mediante el aserrado en laboratorio.



Figura 4-33. Simulación del fresado, probeta Caso 1, vista de frente
Fuente: elaboración propia



Figura 4-34. Simulación del fresado, probeta Caso 1, vista lateral
Fuente: elaboración propia

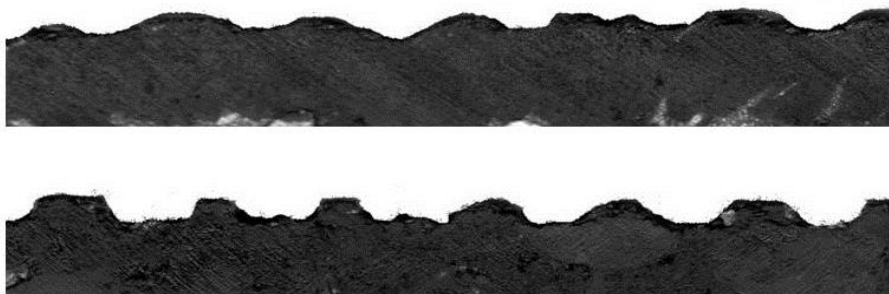


Figura 4-35. Perfil de fresado real versus simulación por aserrado
Fuente: elaboración propia

Entonces, es posible asegurar que si bien el fresado a ser obtenido mediante este medio no resulta idéntico al que se obtiene en obra: posee características que lo asimilan en forma aceptable a los fines del estudio, es fácilmente reproducible en laboratorio y guarda una estrecha relación con el perfil de la Figura 4-2d utilizado en la simulación numérica ya descrita.

Mediante la aplicación de esta técnica de aserrado se obtienen las probetas correspondientes a los 6 casos en análisis (Figura 4-36 a Figura 4-38).



Figura 4-36. Probeta Caso 1 a la izq. y Caso 2 a la der.
Fuente: elaboración propia



Figura 4-37. Probeta Caso 3 a la izq. y Caso 4 a la der.
Fuente: elaboración propia



Figura 4-38. Probeta Caso 5 a la izq. y Caso 6 a la der.
Fuente: elaboración propia

La Figura 4-39 permite observar en forma comparativa la relación de escala entre los casos de simulación.



Figura 4-39. Relación de escala de los casos de simulación
Fuente: elaboración propia

Paso seguido, de acuerdo a lo indicado en la Norma IRAM 1850 (IRAM, 1997), se tamiza arena de río entre los tamices de abertura 315 μm y 160 μm (tamices N°50 y N°100, respectivamente) para obtener material de ensayo Tipo A, según la nomenclatura de la norma citada, como puede advertirse en la Figura 4-40.



Figura 4-40. Tamizado de la arena Tipo A
Fuente: elaboración propia

A continuación, con la arena obtenida y el pisón de ensayo normalizado se realizan las determinaciones sobre las probetas materializadas. En la Figura 4-41 se observan los materiales de ensayo utilizados. En la Figura 4-42 se ve un detalle del pisón normalizado con su superficie de caucho (a la izquierda) y la preparación de los volúmenes de 40 cm^3 de arena para la realización de los ensayos (a la derecha).

Desde la Figura 4-43 a la Figura 4-48, se vuelcan imágenes de los parches de arena obtenidos en cada caso, observándose además la magnitud de los mismos.

En la Tabla 4-8 se aprecian los resultados obtenidos de Diámetros de Parche de Arena (D_i) en sentidos ortogonales, y su promedio señalado como DPA .



Figura 4-41. Elementos de ensayo empleados
Fuente: elaboración propia



Figura 4-42. Detalle pisón normalizado (izq.) y vol. de ensayo (der.)
Fuente: elaboración propia

Tabla 4-8. Registro de Diámetros de Parche de Arena
Fuente: elaboración propia

Caso	D_1 (cm)	D_2 (cm)	DPA (cm)
1	23,8	24,5	24,2
2	20,0	19,6	19,8
3	16,0	16,1	16,1
4	12,8	13,1	13,0
5	11,5	11,7	11,6
6	10,2	10,1	10,2

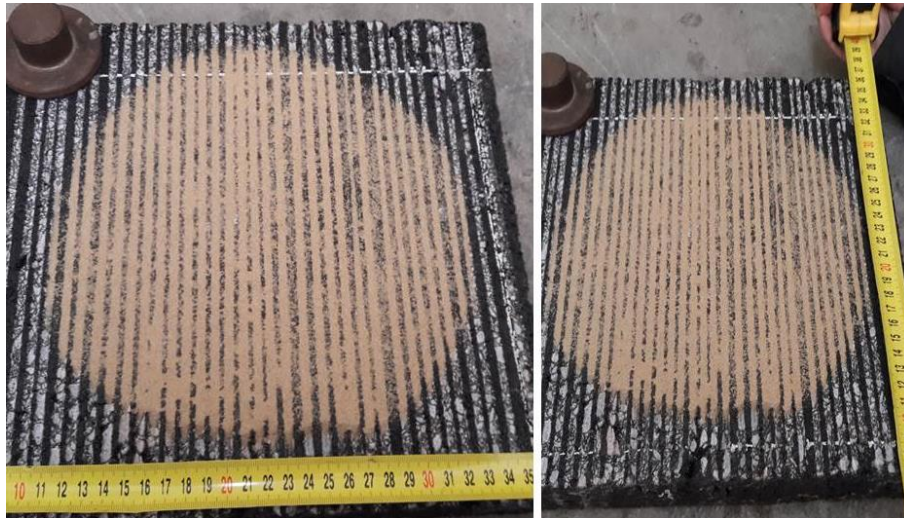


Figura 4-43. Parche de Arena, probeta Caso 1
Fuente: elaboración propia

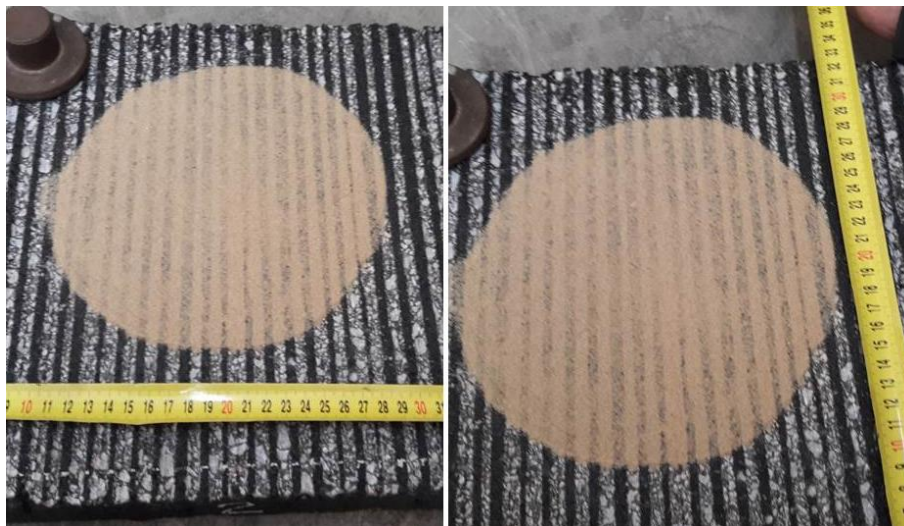


Figura 4-44. Parche de Arena, probeta Caso 2
Fuente: elaboración propia

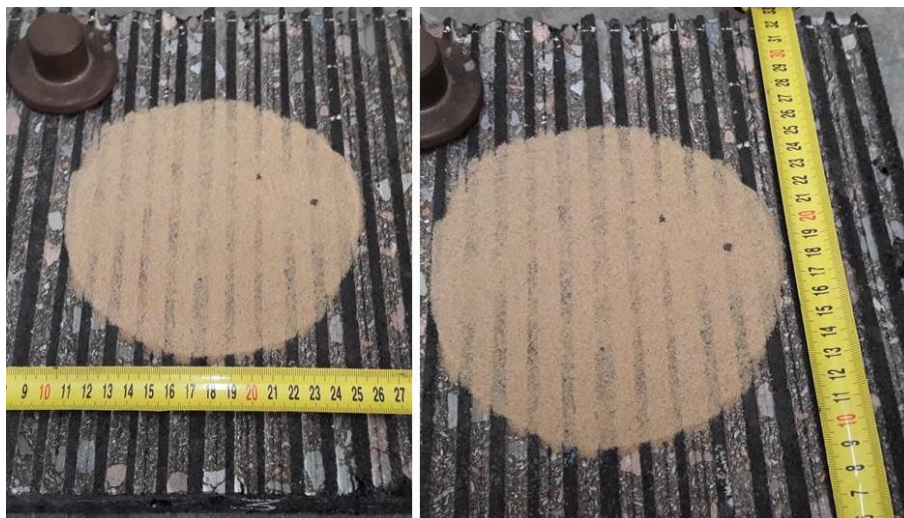


Figura 4-45. Parche de Arena, probeta Caso 3
Fuente: elaboración propia

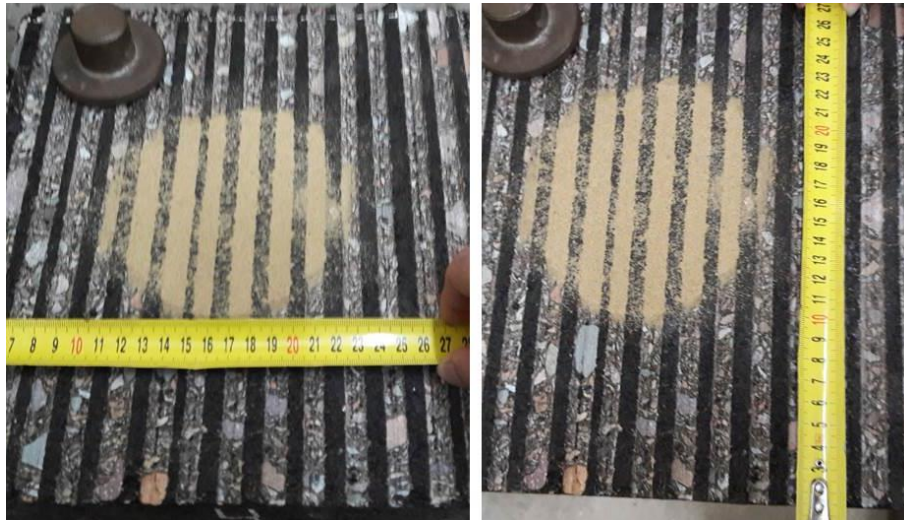


Figura 4-46. Parche de Arena, probeta Caso 4
Fuente: elaboración propia



Figura 4-47. Parche de Arena, probeta Caso 5
Fuente: elaboración propia



Figura 4-48. Parche de Arena, probeta Caso 6
Fuente: elaboración propia

Por último, para facilitar el análisis comparativo de los resultados obtenidos, en la Figura 4-49 se vuelca la nube de diámetros calculados mediante la simulación numérica. Para una mejor apreciación se señala con diferentes colores cada uno de los casos (Caso 1 en azul, Caso 2 en rojo, Caso 3 en verde, Caso 4 en violeta, Caso 5 en celeste y Caso 6 en naranja). Con estos colores se ha sombreado también el área que corresponde a los límites entre un caso y otro. Para ello, se ha tomado la distancia media entre los puntos simulados extremos de cada caso, tanto a la izquierda como a la derecha. Finalmente, se vuelca con una línea de color en correspondencia, los resultados obtenidos en la Tabla 4-8 para cada caso. De este modo, se puede notar como los resultados de Diámetro de Parche de Arena obtenidos, si bien no coinciden exactamente con los entornos de los casos simulados numéricamente, se ubican de forma más o menos centrada dentro de los límites de las áreas sombreadas siguiendo el criterio señalado.

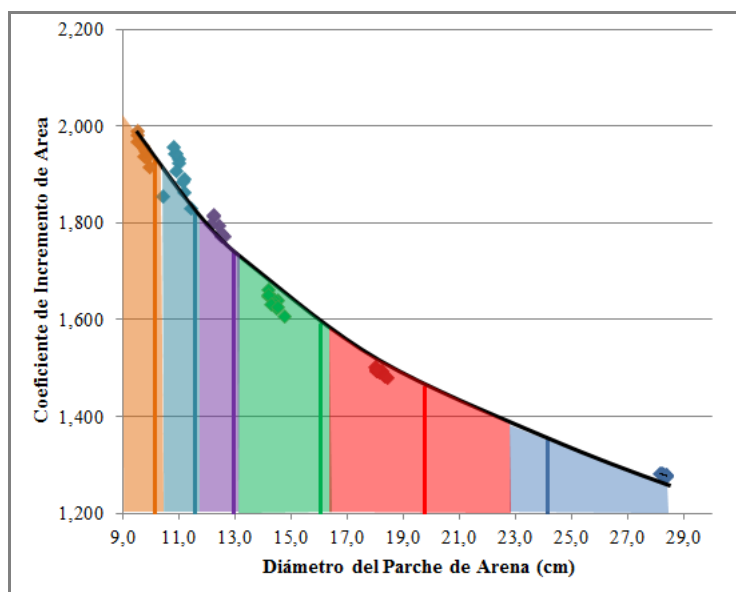


Figura 4-49. Análisis comparativo entre la simulación numérica y de laboratorio
Fuente: elaboración propia

Lo analizado anteriormente, permite suponer un grado de certeza adecuado en el cálculo de los incrementos de área realizados, a ser utilizados más adelante en la determinación de las dotaciones aplicables en los ensayos de corte a efectuarse sobre probetas moldeadas, características de los 6 casos analizados.

No obstante, en relación al contenido de este capítulo, que permite el desarrollo final de la Figura 4-49, existen algunos comentarios adicionales. El primero de ellos se relaciona con el hecho de que en el estudio se adopta el perfil de la Figura 4-2d. Esta decisión llevaría a que se introduzca por la simplificación un grado de error respecto del perfil real, pues este último no resultaría con las paredes de sus surcos exactamente verticales. Por ello, en principio se puede pensar que el volumen de arena necesario para llenar el surco adoptado sería mayor que el que se registraría en la realidad. Por otro lado, en el perfil real existe un volumen de arena que debe rellenar la macrotextura propia del pavimento sometido a fresado, que no sería considerada a los efectos de la simulación numérica generada para el perfil simplificado adoptado. Debido a que la principal prueba de campo realizada (descrita en capítulos venideros y basada en la respuesta mecánica) permite verificar en cierto modo los resultados obtenidos en el presente capítulo, se opta por considerar que ambos volúmenes se compensan en cierto modo, aunque no de manera total. Esta puede ser la causa por la cual las lecturas de *DPA* en los Casos 2 a 6 resultan un tanto mayor a lo simulado. El

segundo comentario que vale la pena realizar se relaciona con la técnica de simulación en laboratorio adoptada para el aserrado. Esto se debe a que, por cuestiones operativas, las magnitudes de los anchos de surco y su profundidad para cada uno de los casos identificados puede ser lograda con cierto grado de precisión no absoluta. Esto se nota especialmente para el Caso 1, que presenta la menor textura. Es posible que esa sea la causa por la cual en la Figura 4-49 la medición realizada para ese Caso dé como resultado un *DPA* un tanto menor al esperado. De todos modos, nuevamente, dado lo volcado en capítulos venideros, se considera a los efectos de esta tesis que el grado de precisión alcanzado en tal sentido es suficiente, al menos en términos relativos en cuanto a las dificultades que implicarían instrumentar otra metodología de trabajo alternativa a la utilizada.

Referencias

ALVARADO, H., BATANERO, C., "Significado del Teorema Central del Límite en textos universitarios de probabilidad y estadística", Revista Estudios Pedagógicos, ISSN 0718-0705, Vol. 34, N° 2: 7-28, Valdivia, Chile, 2008.

BELLO, M., "Apuntes de la capacitación sobre predicción y bondad de ajuste", Capacitaciones Software-Shop, Colombia, 2016.

BUSSARD, M., "Milling & Micro Milling", P.R. Systems Inc., EE UU, 2014.

CARTUCCIA, L., "Bioestadística: Métodos y Aplicaciones", ISBN 847496-653-1, U.D. Bioestadística, Facultad de Medicina, Universidad de Málaga, España, 2009.

CPA, "Proyecto de pliego de especificaciones técnicas generales para mezclas asfálticas en caliente gruesas", Comisión Permanente del Asfalto, Argentina, 2015. [Consultado en julio de 2017 en: <http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/licitaciones/952/documentacion-adicional/CPA%202015%20Gruesas.pdf>]

D'ANDREA, A., TOZZO, C., BOSCHETTO, A., BOTTINI, L., "Interphase roughness parameters and shear strength", Modern Applied Science (ISSN 1913-1844), Canadian Center of Science and Education, vol 7, n 10, Canadá, 2013.

DNV, "Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos", Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_1.pdf]

IRAM, "Norma IRAM 1850: Agregados. Método de determinación de la profundidad de la macrotextura superficial de un pavimento mediante el círculo de arena", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1997.

JUDGE, G., "Simple Monte Carlo studies on a spreadsheet", Computers in Higher Education Economics Review (CHEER), Vol. 13, núm. 2, pp 12-14, EEUU, 1999.

MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F., TEORO CARMO, C.A., "Avaliação da aderencia de geogrelhas entre camadas asfálticas", Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.

RAAB, C., PARTL, M.N., "Interlayer shear performance: Experience with different pavement structures", 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna, Book 1, 535-545, Austria, 2004.

STATGRAPHICS, "Statgraphics plus manual", Statical Graphics Corporation, EEUU, 2000.

THE ASPHALT CONTRACTOR, "How Micromilling is Saving States Money on Asphalt Road Repairs", The Asphalt Contractor Magazine, 30 de noviembre de 2011. [Consultado 12 de diciembre de 2016 en: <http://www.forconstructionpros.com/article/10456001/how-micromilling-is-saving-states-money-on-asphalt-road-repairs>]

WIRTGEN, "Wirtgen cold milling manual. Technology and application", Wirtgen GmbH, Alemania, 2013.

ZHANG, N., ZHENG, N.X., CONG, Z.H., "Influencing factors on bonding layer performance effect between the ultra-thin surface", Functional Pavement Design (ISBN 978-1-138-02924-8), Proceedings of the 4° Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design, CEW 2016, Netherlands, 2016.

5. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE RIEGO DE LIGA PARA LA SUPERFICIE NO FRESADA

Primeramente, para poder analizar la influencia del incremento de la superficie de la interfase en los sistemas abordados, dada la existencia del fresado, se debe contar con una dotación de referencia del riego de liga. Ésta, al ser sometida a correcciones, permitirá arribar a conclusiones mediante el análisis comparativo de resultados. Se aborda en el presente capítulo la determinación de esta dotación para el caso de la no existencia del fresado en la interfase (superficie "lisa"), que será después utilizada con diversas afectaciones en el análisis de las situaciones de la interfase con fresado. Previamente, se realiza una descripción de los materiales constituyentes de un sistema de refuerzo como el analizado y la caracterización de los materiales a ser empleados en los estudios a efectuarse en particular.

5.1. Los materiales componentes de los sistemas de refuerzo que implican un riego de liga

5.1.1. La emulsión asfáltica constituyente del riego de liga

La emulsión asfáltica es una dispersión coloidal de partículas de cemento asfáltico en agua asistida por un agente emulsificante, lo cual permite su aplicación a temperatura ambiente sin la necesidad del calentamiento previo de ningún componente. Cuando la emulsión pierde humedad, las partículas de asfalto vuelven a entrar en contacto y proporcionan al material la cohesión necesaria para cumplir su función conglomerante. Este proceso se conoce como maduración de la emulsión y al primer momento cuando el agua empieza a evaporarse se le denomina rotura de la emulsión, aunque coloquialmente al fenómeno de maduración de la mezcla se le suele denominar "curado" de la emulsión (Martínez-Echevarría, 2012). En el Anexo D se observa una descripción detallada de las características principales de las emulsiones asfálticas empleadas en riegos de liga.

La elección de la emulsión para cada aplicación vial es una cuestión de adecuación de la reactividad de la emulsión con la reactividad de los áridos y las condiciones ambientales (Mercado et al., 2008). En la actualidad se emplean como riego de liga las emulsiones Catiónicas de Rotura Rápida (CRR). La selección de la emulsión catiónica se ve justificada dado que posee mayor afinidad con gran parte de los áridos presentes en los paquetes estructurales de pavimentos que se emplean en nuestra región (agregados graníticos y silíceos). Por otro lado, las emulsiones aniónicas no son recomendables, ya que el mecanismo principal que genera la rotura de la emulsión es la evaporación del agua, por lo que presentan comportamientos de rotura de notable lentitud, con fuerte dependencia en las condiciones climáticas y baja adherencia con los agregados pétreos, particularmente con los silíceos.

Generalmente, el recapado asfáltico es empleado en tareas de mantenimiento, donde constructivamente se buscan minimizar los tiempos de intervención, para poder habilitar al tránsito cuanto antes los caminos o vías que se encuentran en reparación. Es allí que las emulsiones de rotura rápida cobran verdadera importancia, pues minimizan los tiempos existentes entre la construcción o reparación de la capa subyacente asfáltica y la construcción de la nueva carpeta de rodamiento asfáltica en caliente. Algunas publicaciones aseguran, también, que las emulsiones catiónicas son menos sensibles al contacto con la humedad y a la temperatura (Ricci, 2011). En la presente tesis, la calidad de la emulsión no es una variable a ser tomada en cuenta dentro de las determinaciones a ejecutarse. Esto se debe a que el principal factor a evaluarse inicialmente es su dotación óptima para la interfase entre superficies lisas y, en los capítulos venideros, para la tipología de fresado que se aplique sobre la capa asfáltica existente, de acuerdo a los parámetros a ser expuestos oportunamente. Dado

que se busca que se mantengan constantes las cualidades de la emulsión, todos los ensayos se efectúan con la misma partida del producto, la cual se almacena en las cantidades y condiciones óptimas, al inicio de las determinaciones de laboratorio.

La norma "IRAM 6691 Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas convencionales" (IRAM, 2008), en su "Tabla B.1. Diferentes usos de las emulsiones catiónicas convencionales en construcciones viales" (Tabla 5-1), presenta las recomendaciones del tipo de emulsión a emplearse según el uso que se le da en obra. Como puede observarse, queda corroborada la decisión de adoptar una emulsión catiónica de rotura rápida como riego de liga. Las Tabla 5-2 y Tabla 5-3 presentan lo que establece dicha Norma como requisitos para cada tipología de emulsión asfáltica.

Tabla 5-1. Usos viales de las emulsiones asfálticas catiónicas

Fuente: IRAM, 2008

A = Aconsejable; P = Posible

Aplicación	Rotura Rápida			Rotura Media		Rotura Lenta	Rotura Superestable
	CRR-0	CRR-1	CRR-2	CRM-1	CRM-2	CRL	CRS
Riegos de liga, de curado en negro	A	P					
Tratamientos Superficiales	P	A	A	P			
Mezclas en frío abiertas				A	A		
Mezclas en frío almacenables para bacheos				P	A		
Mezclas densas en frío						P	A
Riegos antipolvo						P	A
Estabilizaciones de suelos. Grava emulsión						P	A
Lechadas asfálticas convencionales						A	A

Tabla 5-2. Requisitos de las emulsiones asfálticas

Fuente: IRAM, 2008

Características	Unidad	Requisitos de las Emulsiones																Método de ensayo					
		Rotura rápida						Rotura media				Rotura lenta		Superestable		Imprimación			Rotura controlada		Reciclado en frío		
		CRR-0		CRR-1		CRR-2		CRM-1		CRM-2		CRL		CRS		CI			CRC		CRF		
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.		Min.	Max.	Min.	Max.	
Viscosidad Saybolt Furol a	25°C	-	50	-	50	-	-	20	-	-	-	-	50	-	50	-	50	-	50	-	35	IRAM 6721	
	50°C	-	-	-	-	20	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Residuo asfáltico por destilación (*)	g/100g	57	-	62	-	65	-	60	-	60	-	60	-	60	-	40	-	60	-	60	-	IRAM 6719	
Hidrocarburos destilables	ml/100ml	-	3	-	3	-	3	-	-	-	12	-	-	-	-	5	15	-	-	-	-	IRAM 6719	
Contenido de agua	g/100g	-	43	-	38	-	35	-	40	-	40	-	40	-	40	-	55	-	40	-	40	IRAM 6719	
Asentamiento	g/100g	-	5	-	5	-	5	-	5	-	12	-	5	-	5	-	15	-	5	-	10	IRAM 6716	
Residuo sobre tamiz IRAM 850 µm	g/100g	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	IRAM 6717 y 5.1	
Recubrimiento y resistencia al agua (**)	-	80	-	80	-	80	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	IRAM 6679	
Mezcla con cemento	g/100g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-	-	-	-	2	-	2	IRAM 6718
Mezcla con arena silíceas y agua (**)	-	-	-	-	-	-	-	Debe cumplir el ensayo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.3	
Mezcla de lechada asfáltica para clima cálido (**)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Debe cumplir el ensayo	-	-	-	-	-	-	5.3	
Carga de partículas	-	Positiva																			IRAM 6690		

Tabla 5-3. Requisitos del residuo de destilación
Fuente: IRAM, 2008

Características	Unidad	Requisitos del Residuo asfáltico																		Método de ensayo		
		Rotura rápida						Rotura media				Rotura lenta		Superestable		Imprimación		Rotura controlada			Reciclado en frío	
		CRR-0		CRR-1		CRR-2		CRM-1		CRM-2		CRL		CRS		CI		CRC			CRF	
Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.			
Penetración del residuo (°)	0,1 mm	50	200	50	200	50	200	50	200	70	300	50	200	50	200	200	300	50	200	50	200	IRAM 6576
Ductilidad	cm	80	-	80	-	80	-	80	-	50	-	80	-	80	-	40	-	80	-	80	-	IRAM 6579
Solubilidad en 1,1,1-tricloroetano o tricloroetileno	g/100 g	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	IRAM 6585 y 52
Ensayo de Olenis	-	Negativo																			IRAM 6594	

(*) Las emulsiones convencionales con valores de penetración menores que los establecidos, se designan añadiendo la letra d. Por las condiciones particulares de la obra, se pueden establecer otros valores de penetración en el residuo de las emulsiones.

La emulsión asfáltica a ser empleada en los ensayos y análisis constituyentes de este estudio, cuya denominación comercial es Probimul CR-62 (emulsión catiónica de corte rápido), reúne las características que se resumen en la Tabla 5-4. Se ve, entonces, que cumple con los requisitos para una emulsión CRR-0.

Tabla 5-4. Caracterización de la emulsión para el riego de liga
Fuente: elaboración propia

ENSAYOS	UNIDAD	RESULTADO	NORMA
De la emulsión			
Viscosidad Saybolt-Furol a 50 °C	seg	23	IRAM 6721
Betún asfáltico residual	% en peso	63,2	IRAM 6719
Asentamiento en 5 días	% en peso	1,2	IRAM 6716
Residuo sobre tamiz IRAM 850 µm (N°20)	% en peso	0,005	IRAM 6717
Del residuo asfáltico			
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	0,1 mm	84	IRAM 6576
Punto de ablandamiento	°C	49	IRAM 6841
Viscosidad a 60 °C (Aguja 29, 1 RPM)	dPa.seg	1190	IRAM 6837
Densidad	g/cm ³	1,000	IRAM 6586

5.1.2. Las mezclas asfálticas en caliente

Respecto al diseño y proyecto de un pavimento se tiene que considerar dos aspectos. En primer lugar, la función resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que se emplearán en su construcción. En segundo lugar, la finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas del pavimento, para que resulten seguras y confortables.

Las capas superiores del pavimento se conforman, en la mayoría de los casos, mediante lo que se conoce como una mezcla asfáltica en caliente. Este material se logra a partir de la combinación de un ligante asfáltico convencional o modificado, áridos (incluido el relleno mineral o *filler*) y eventualmente aditivos, tales como mejoradores de adherencia, fibras, etc. Son fabricadas en plantas diseñadas a tal efecto y colocadas en obra a una temperatura muy superior a la del ambiente (CPA, 2015).

Respecto de este material, el Programa Estratégico de Investigaciones en Carreteras (*Strategic Highway Research Program - SHRP*), presentado en su versión original en 1993 y en su reciente segunda edición denominada SHRP-2, señala la existencia de tres características fundamentales para garantizar su durabilidad: bajo volumen de vacíos de aire en la mezcla compactada, alto contenido de asfalto efectivo y el empleo de granulometrías con menores tamaños máximos, Esto coincide con lo publicado en la TRL Road Note 42 (2008) (Bolzán, 2016).

La combinación de agregados pétreos de una mezcla asfáltica puede estar compuesta por:

- Agregado grueso: es la parte del agregado total retenida en el Tamiz IRAM 4,75 mm (Tamiz N° 4). Comercialmente, en el ámbito de la región central de la Argentina, estas fracciones de agregados están constituidas principalmente por piedra partida 6:20, 6:12, etc.; denominación que hace referencia al tamaño nominal mínimo y máximo en milímetros de las partículas que componen la fracción.
- Agregado fino: es la parte del agregado total pasante por el Tamiz IRAM 4,75 mm (Tamiz N° 4). Los agregados finos, en la región central de la Argentina, generalmente están constituidos por arenas provenientes de la trituración de rocas, comúnmente denominadas arenas de trituración 0:6. También en menor proporción se suelen utilizar arenas silíceas.
- Relleno mineral: es la fracción pasante del Tamiz IRAM 0,075 mm (Tamiz N° 200), de la mezcla compuesta por los agregados y el relleno mineral de aporte.
- Relleno mineral de aporte (*filler* de aporte): se define así a aquellos que puedan incorporarse a la mezcla por separado y que no provengan de la recuperación de los agregados. En el ámbito local generalmente se emplea como *filler* de aporte a la cal comercial.

En cuanto a los agregados pétreos de la mezcla, que conforman su esqueleto granular, puede decirse que son uno de los principales responsables de la obtención de una adecuada estabilidad. Las distintas fracciones de agregados forman un ensamble, en el cual los huecos generados entre partículas de mayor tamaño son rellenados por partículas de tamaño intermedio y sucesivamente con partículas de menor tamaño. El agregado constituye normalmente cerca del 95 % en peso del total de la mezcla, es por ello que en las capas superiores del pavimento la influencia de la calidad de los áridos empleados tiene una vital importancia para lograr una mezcla estable y de buen comportamiento.

Generalmente, los asfaltos de mayor empleo son los que se conocen por su clasificación como aquellos de penetración y/o viscosidad intermedia. El asfalto, está compuesto primordialmente por moléculas complejas de hidrocarburos, pero también contienen otros átomos; como ser oxígeno, nitrógeno y sulfuro. La principal propiedad que le confiere el asfalto a la mezcla es su adhesividad o poder ligante, mediante el cual se mantienen íntimamente unidas las partículas de los agregados. Otra de las propiedades importantes del ligante asfáltico es su impermeabilidad y la resistencia a la mayoría de los ataques químicos que pueden generar los ácidos, los álcalis y las sales. Por último, su susceptibilidad térmica, o comportamiento termoplástico, marca la diferencia de comportamiento entre los distintos intervalos térmicos a los cuales puede estar expuesto. Los asfaltos convencionales poseen una elevada viscosidad a baja temperatura y a medida que son sometidos a temperaturas mayores su viscosidad desciende considerablemente (Ricci, 2011).

Por su parte, la combinación de los componentes constitutivos de la mezcla debe ser tal que se logren los requerimientos comunes que se le exigen a las mezclas asfálticas, los cuales son (CPA, 2015):

- Suficiente trabajabilidad.
- Suficiente cantidad de asfalto para asegurar la durabilidad.
- Suficiente estabilidad bajo cargas de tránsito.
- Suficientes vacíos de aire (límite superior para prevenir los daños del clima y límite inferior para dar lugar a la post compactación).

Otras propiedades deseables de la mezcla son (CPA, 2015):

- Flexibilidad
- Resistencia a la fatiga
- *Stiffness* (rigidez) adecuada para que presente un óptimo desempeño frente a cargas dinámicas
- Resistencia al deslizamiento
- Impermeabilidad

Teóricamente, en una repavimentación las capas asfálticas cumplen una función estructural, pero en muchos casos sus funciones superficiales son más importantes. La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias deseables para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente, hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias. Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, textura, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. Por ejemplo, en regiones frías se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero. Si estas mezclas no proporcionan la textura adecuada, se debe recurrir a trabajar sobre su macrotextura en forma externa para brindar las condiciones de seguridad necesarias. En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitudes a que están sometidas. La calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

La Comisión Permanente del Asfalto define en su Proyecto de Pliego de Especificaciones Técnicas Generales (CPA, 2015) a las siguientes tipologías de mezclas asfálticas:

- CAC-D19: concreto asfáltico convencional denso, tamaño máximo del agregado de 19 mm y granulometría continua.
- CAC-S19: concreto asfáltico convencional semidenso, tamaño máximo del agregado de 19 mm y granulometría continua.
- CAC-G19: concreto asfáltico convencional grueso, tamaño máximo del agregado de 19 mm y granulometría continua.
- CAC-S25: concreto asfáltico convencional semidenso, tamaño máximo del agregado de 25 mm y granulometría continua.
- CAC-G25: concreto asfáltico convencional grueso, tamaño máximo del agregado de 25 mm y granulometría continua.
- CAD-20: concreto asfáltico drenante, tamaño máximo del agregado de 19 mm, con alto contenido de vacíos (>20 %) y con la utilización de asfaltos modificados con polímeros.
- SMA-20: concreto asfáltico tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), tamaño máximo del agregado de 19 mm, formado por un esqueleto pétreo autoportante y mástico con alto contenido de ligante asfáltico, *filler* y fibras.

Por su parte, el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 2017) establece para las tipologías de mezclas convencionales la misma identificación de las mezclas asfálticas CAC-D19 y adiciona las mezclas CAS-D19, que son del tipo semicaliente. Esta especificación incluye algunos detalles diferentes y adicionales que limitan su diseño respecto a lo especificado por la CPA (2015).

De acuerdo a lo especificado, la mezcla asfáltica seleccionada para la investigación, tanto para la constitución del sustrato inferior como superior, es un concreto asfáltico convencional denso elaborado en caliente del tipo CAC-D19. De acuerdo a DNV (2017) dicha mezcla debe constituirse en un espesor que va de 2,5 a 6,0 veces su tamaño máximo nominal, es decir de 48 mm a 114 mm, lo cual encuadra muy bien con el espesor total y de las dos capas constituyentes de las probetas dobles a ser empleadas en la experiencia.

Para la mezcla asfáltica CAC-D19, se especifican en forma resumida los parámetros Marshall y las granulometrías límites (Tabla 5-5) de (DNV, 2017):

Número de golpes por cara: 75
 Estabilidad mínima: 10 KN (1019,7 kg)
 Relación Estabilidad/Fluencia: 2,5-4,5 KN/mm (2549-4589 kg/cm)
 Vacíos del Agregado Mineral mínimo: 14 %
 Porcentaje de Vacíos: 3-5 %

Tabla 5-5. Curvas granulométricas para una mezcla CAC D-19
 Fuente: DNV, 2017 (elaboración propia)

Tamiz	Pasa Tamiz (%)	
	C. Min	C. Max
25 mm (1")	100	100
19 mm (3/4")	83	100
9,5 mm (3/8")	60	75
4,75 mm (N°4)	42	60
2,36 mm (N°8)	29	47
600 µm (N°30)	15	29
300 µm (N°50)	11	21
75 µm (N°200)	4	8

Asimismo, se especifican algunos parámetros adicionales de interés relacionados con el ensayo de *Wheel Tracking Test* (WTT) (DNV, 2017), los cuales se observan en la Tabla 5-6 y la Tabla 5-7.

Tabla 5-6. Parámetros WTT exigidos a una mezcla CAC-D19
 Fuente: DNV, 2017 (elaboración propia)

EVALUACION DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO "WHEEL TRACKING TEST" (NORMA EN 12697-22 - PROCEDIMIENTO B)				
Pendiente Media de Deformación (WTSaire) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD)				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTSaire ≤ 0,08	WTSaire ≤ 0,10	WTSaire ≤ 0,12	WTSaire ≤ 0,15
	PRD ≤ 5	PRD ≤ 8	PRD ≤ 10	PRD ≤ 10
Base	WTSaire ≤ 0,10	WTSaire ≤ 0,12	WTSaire ≤ 0,15	WTSaire ≤ 0,15
	PRD ≤ 8	PRD ≤ 10	PRD ≤ 10	PRD ≤ 12

Tabla 5-7. Clasificación por tránsito aplicable a una mezcla CAC-D19
 Fuente: DNV, 2017 (elaboración propia)

Indice de tránsito (IT)	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
	≥1500	800-1499	200-799	≤ 199

El Índice de Tránsito (*IT*) se calcula con la expresión de la Ecuación 5-1.

$$IT = TMDA_i \times P_d \quad (5-1)$$

Donde:

$TMDA_i$ = Tránsito Medio Diario Anual de diseño [veh/día]

P_d = porcentaje de $TMDA_i$ correspondiente a tránsito pesado [%]

A partir de estos parámetros, se selecciona una mezcla CAC-D19 a ser empleada en el desarrollo de la tesis, la cual es producida por una empresa de la región de La Plata. Dicha empresa elabora sus mezclas mediante una planta asfáltica fija. Se realiza la toma de muestras en suficiente cantidad para llevar a cabo el conjunto de todos los ensayos requeridos para la presente tesis. De acuerdo a lo declarado por la empresa productora, la mezcla asfáltica en cuestión se constituye de los materiales que a continuación se detallan:

- Piedra Partida 6:20
 - Cantera: PIATTI (Olavarría)
 - Pesos Específicos (VN-E13-67, IRAM 1533)
 - Peso Específico Aparente (g/cm³): 2,729
 - Peso Específico Saturado (g/cm³): 2,713
 - Peso Específico Seco (g/cm³): 2,704
 - Absorción Norma (IRAM 1533, VN-E13-67)
 - Absorción (%): 0,3
- Arena de Trituración 0:6
 - Cantera: PIATTI (Olavarría)
 - Pesos Específicos (VN-E13-67, IRAM 1533)
 - Peso Específico Aparente (g/cm³): 2,734
 - Peso Específico Saturado (g/cm³): 2,708
 - Peso Específico Seco (g/cm³): 2,693
 - Absorción (IRAM 1533, VN-E13-67)
 - Absorción (%): 0,6
- Cal
 - Peso Específico (g/cm³): 2,564
- Cemento Asfáltico
 - Viscosidad Brookfield (60 °C, poise): 1724
 - Clasificación: CA-20
 - Densidad Relativa (g/cm³): 1,000

La dosificación empleada denunciada por la empresa proveedora es la que se vuelca en la Tabla 5-8.

Tabla 5-8. Dosificación de la mezcla CAC-D19
Fuente: elaboración propia

Material	Porcentaje en peso (%)
Piedra partida 6:20	47,6
Arena de trituración 0:6	46,6
Cal	1,0
Cemento asfáltico CA-20	4,8

De dicha mezcla asfáltica, se toma una muestra de la producción del día 29/06/2017. Sobre esa muestra se determina mediante el procedimiento LEMaC-A01/06 (LEMaC, 2016) el Contenido de Cemento Asfáltico de 4,8 % (idéntico al de la dosificación

oficial) y la curva granulométrica de los áridos recuperados de la Tabla 5-9, graficada en la Figura 5-1.

Tabla 5-9. Granulometría de los áridos recuperados de la mezcla CAC-D19
Fuente: elaboración propia

Tamiz	Pasa Tamiz (%)		
	C. Min	CURVA	C. Max
25 mm (1")	100	100,0	100
19 mm (3/4")	83	99,1	100
9,5 mm (3/8")	60	70,2	75
4,75 mm (N°4)	42	51,2	60
2,36 mm (N°8)	29	40,8	47
600 µm (N°30)	15	21,8	29
300 µm (N°50)	11	15,0	21
75 µm (N°200)	4	5,1	8

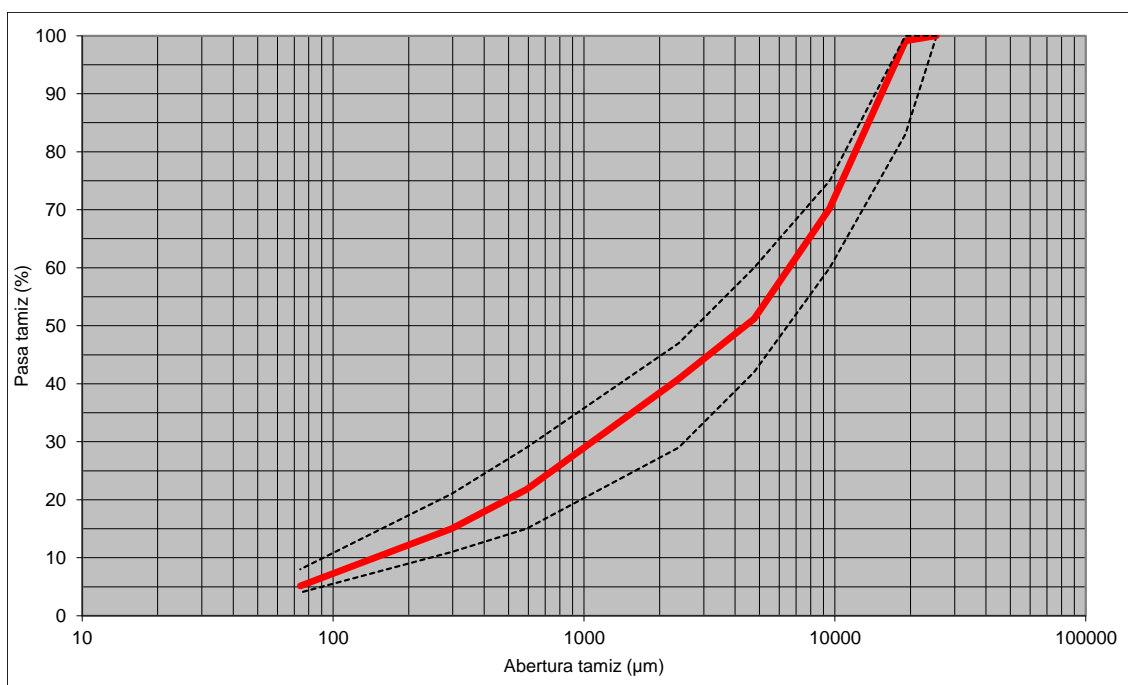


Figura 5-1. Gráfica de los áridos recuperados de la mezcla CAC-D19
Fuente: elaboración propia

Además, la muestra se analiza mediante la metodología Marshall y el resto de ensayos especificados. Se obtienen así los resultados de la Tabla 5-10.

Por otro lado, se determina su potencial de ahuellamiento mediante el ensayo de WTT, según se observa en la Figura 5-2. Se obtienen así los resultados que se transcriben a continuación y la curva de ahuellamiento de la Figura 5-3.

Densidad Marshall de Referencia (g/cm^3): 2,412
 Densidad de la probeta WTT (g/cm^3): 2,407
 Coeficiente de compactación probeta WTT (%): 99,8

WTS: Pendiente media de ahuellamiento ($\text{mm} \cdot 10^{-3}$ ciclos): 0,056
 RD: Profundidad media de la huella (mm): 1,88
 PRD: Profundidad de ahuellamiento medio proporcional (%): 3,76

Tabla 5-10. Parámetros de la mezcla CAC-D19 empleada
Fuente: elaboración propia

PROB	Dm (gr/cm ³)	E (kg)	F (mm)	V (%)	Rel E/F (kg/cm)
1	2,411	1189	2,8	4,4	4247
2	2,413	1235	2,8	4,4	4411
3	2,413	1259	2,8	4,4	4496
PROMEDIO	2,412	1228	2,8	4,4	4385
MEDIA	2,412	1227	2,8	4,386	4384
DESVIO ESTANDART	0,0012	35,4	0,00	0,05	126,6
COEFICIENTE DE VARIACION	0,0479	2,9	0,00	1,04	2,9

Densidad Rice (g/cm³) =

Pasa tamiz N°200 mezcla (%) =

Relación Peso Filler/Peso Asf =

Vacíos del Agregado Mineral (%) =

Test de Lottman Modificado (AASHTO 182 modificada)

CONDICION	PROBETA	RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (kg/cm ²)	PROMEDIO (kg/cm ²)	RELACION TSR (%)
Sin acondicionar	1	9,1	9,2	84,8
	2	9,1		
	3	9,4		
Acondicionada	4	7,8	7,8	
	5	7,7		
	6	8,0		

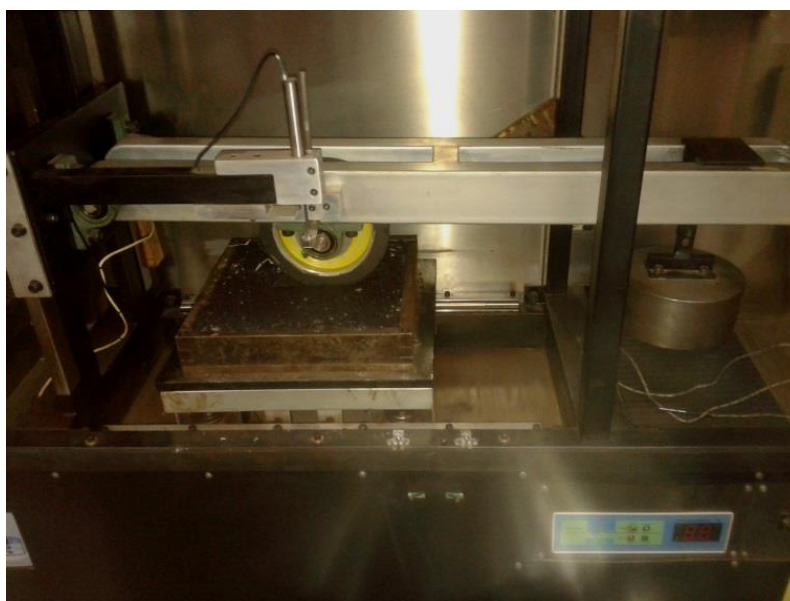


Figura 5-2. Equipo de *Wheel Tracking Test* del LEMaC
Fuente: elaboración propia

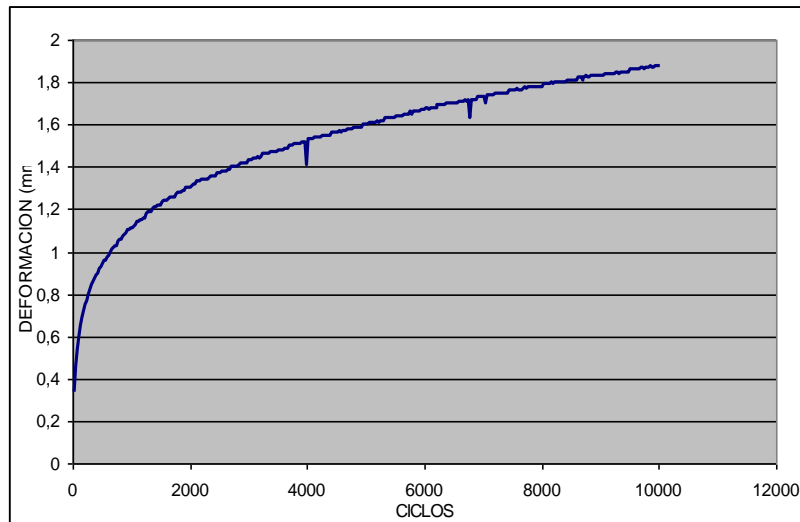


Figura 5-3. Curva Deformación (Huella) versus ciclos de carga
Fuente: elaboración propia

Entonces, se observa que se trata de una mezcla asfáltica en caliente que cumple ampliamente con las más altas exigencias establecidas en el país para su tipología y que, por lo tanto, puede ser utilizada como representativa en el presente estudio.

5.2. Estudio de la dotación óptima del riego de liga para los materiales empleados en esta experiencia

En esta parte del estudio se busca establecer la dotación óptima de riego de liga, para la combinación de materiales a ser empleados a lo largo del mismo (capas asfálticas y emulsión asfáltica) cuando la interfase se encuentra generada por las caras lisas de las capas en contacto. Por ello, se decide efectuar el análisis en tal sentido ante juegos de probetas dobles sin aplicación de riego de liga y ante contenidos crecientes del mismo, a efectos de establecer la situación óptima de acuerdo a los parámetros indicadores planteados. Dado lo ya expresado, se emplea el ensayo de corte directo establecido como de referencia, según fuera oportunamente expresado. Se recuerda en tal sentido, en función de lo señalado en capítulos anteriores, que no se busca aquí obtener un valor mínimo de referencia especificado, pues las especificaciones aplicables no han sido generadas en función de esa metodología de ensayo en particular. Por ello, el contenido óptimo corresponde a aquel que permita obtener los máximos valores de resistencia ante la sollicitación aplicada.

Esto guarda total correspondencia con otros trabajos llevados adelante por investigadores que se han encontrado con similares particularidades en sus estudios. Como ejemplo de lo expresado, puede tomarse al trabajo del equipo liderado por Zhang (2016), del cual se obtienen las curvas que se observan en la Figura 5-4. En ésta se pueden ver los valores de Máxima Tensión Tangencial con contenidos de dos tipos de emulsión asfáltica (con su correspondiente equivalencia al contenido de residuo asfáltico) a diferentes temperaturas de ensayo. Además, se observa cómo, independientemente de la temperatura analizada, el contenido óptimo obtenido en este caso fue el mismo.

Por su parte, Giovanon y Buono (2008), mediante aplicaciones de sistemáticas de ensayo análogas, han podido establecer dotaciones óptimas de residuo asfáltico en diversos casos, que varían entre 0,12 l/m² y 0,40 l/m². En cambio, White (2015) acota el rango al expresar que éstas pueden ubicarse de 0,15 l/m² a 0,20 l/m². Por último,

Vargas y Torres (2017) señalan lo expresado en tal sentido por diversas publicaciones de referencia, de acuerdo a lo que se observa en la Tabla 5-11.

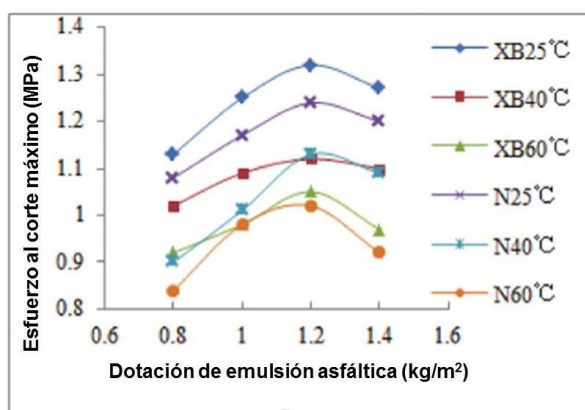


Figura 5-4. Máxima Tensión Tangencial en ensayos al corte
Fuente: Zhang et al., 2016 (traducción propia)

Tabla 5-11. Dotaciones de riego de liga óptimas habituales
Fuente: Vargas y Torres, 2017

Autor	Tasa residual de asfalto (l/m ²)
Paul y Scherocman	0,050-0,280
International Bitumen Emulsion Federation	0,090-0,420
Instituto del Asfalto	0,090-0,230
Hot Mix Asphalt Handbook 2000	0,185-0,28

De acuerdo a los entornos de dotaciones recomendados por la bibliografía de consulta, se decide analizar los contenidos de riego de liga, expresados como su residuo asfáltico por unidad de superficie, de 0,0 l/m², 0,1 l/m², 0,2 l/m², 0,3 l/m² y 0,4 l/m². Se establece un número de 3 probetas por contenido y se procede, por ello, a moldear las 15 probetas de base a ser analizadas. En la Figura 5-5 se observa el desmolde de las probetas durante su elaboración y en la Figura 5-6 las probetas confeccionadas.



Figura 5-5. Desmolde de probetas de base
Fuente: elaboración propia

A dichas probetas se le determina su Densidad Marshall. Se obtienen así, los resultados que se vuelcan en la Tabla 5-12, junto con el correspondiente resumen estadístico, mediante el cual se confirma la tendencia a la distribución normal en sus resultados y lo acotado de su dispersión. Además, se observa como la Densidad Media de esta serie de probetas se ubica en un 99,6 % respecto de la Densidad de

Referencia Marshall, lo cual se considera en un valor lo suficientemente aproximado, que verifica la metodología de moldeo especificada.

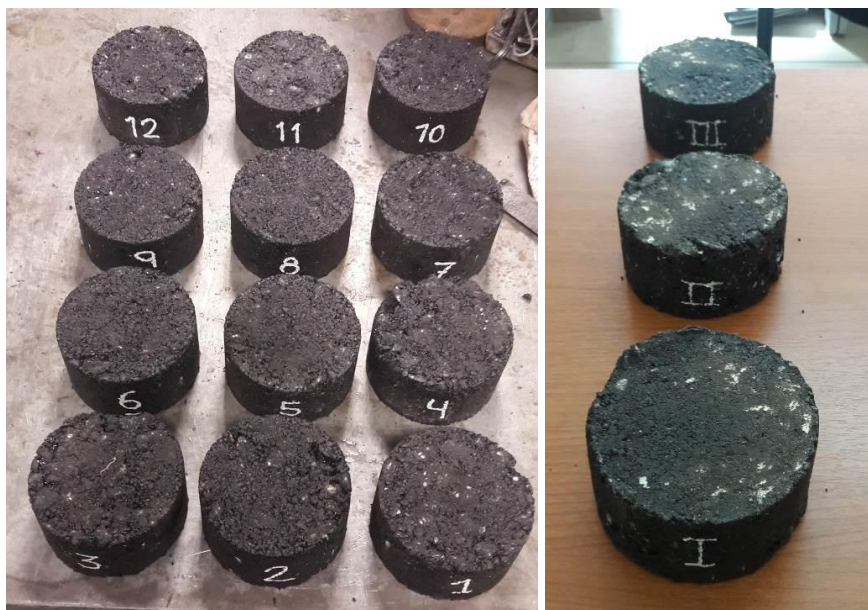


Figura 5-6. Base de las probetas dobles 1 a 12 y I a III
Fuente: elaboración propia

Luego, se realizan los cálculos para establecer la dotación del riego de emulsión asfáltica a ser aplicado por probeta. A tal fin, se toma la densidad de la emulsión asfáltica de $1,000 \text{ g/cm}^3$. De esta manera, se obtienen los resultados de la Tabla 5-13.

A partir de estas dotaciones se realiza la aplicación del riego de liga sobre las probetas de base moldeadas a tales efectos. En la Figura 5-7 puede verse la aplicación del riego en la cantidad de 1,2 g correspondiente a la dotación de $0,1 \text{ l/m}^2$ de residuo asfáltico.

Tabla 5-12. Densidades de bases de probetas 1 a 12 y I a III, y su estadística
Fuente: elaboración propia

Probeta	Densidad (g/cm^3)	Estadístico	Resultado
1	2,397	Media	2,401
2	2,394	Error típico	0,001
3	2,403	Mediana	2,401
4	2,405	Moda	2,397
5	2,397	Desviación estándar	0,005
6	2,408	Varianza de la muestra	3,0171E-05
7	2,402	Curtosis	-1,10
8	2,411	Coefficiente de asimetría	0,38
9	2,405	Rango	0,017
10	2,397	Mínimo	2,394
11	2,395	Máximo	2,411
12	2,395	Cuenta	15
I	2,401	Coefficiente de variación	0,2%
II	2,399		
III	2,409		

Tabla 5-13. Riego de emulsión asfáltica en probetas 1 a 12 y I a III
Fuente: elaboración propia

PROBETAS	DOTACION RESIDUO (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)
1 a 3	0,0	0,0	0,0
4 a 6	0,1	158,2	1,2
7 a 9	0,2	316,5	2,5
10 a 12	0,3	474,7	3,7
I a III	0,4	632,9	5,0

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm ²):	78,5
AREA (m ²):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%

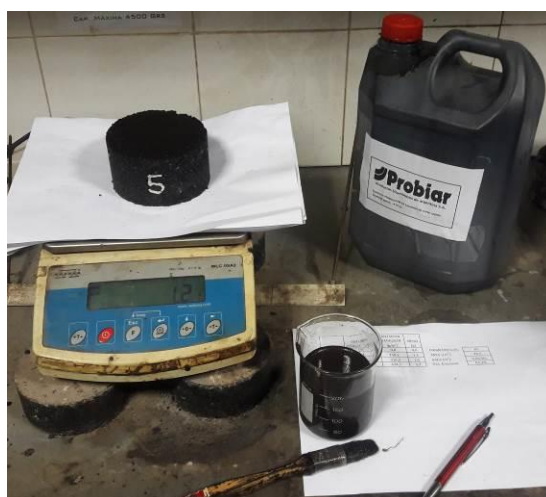


Figura 5-7. Aplicación de las dotaciones de riego en estudio
Fuente: elaboración propia

A continuación, con la totalidad de las probetas tratadas se procede al moldeo de la capa asfáltica superior de acuerdo a la metodología especificada y se obtienen las probetas dobles 1 a 12 y I a III deseadas. En la Figura 5-8 se ven imágenes de dichas probetas.



Figura 5-8. Probetas dobles 1 a 12 y I a III
Fuente: elaboración propia

Nuevamente, como en el caso de las bases, a dichas probetas se le determina su Densidad Marshall. Así, se obtienen los resultados que se vuelcan en la Tabla 5-14, junto con el correspondiente resumen estadístico. Este último permite confirmar la tendencia a la distribución normal en los resultados y lo acotado de su dispersión. La Densidad Media de las probetas es de un 99,8 % de la obtenida para las bases y de un 99,4 % respecto de la Densidad de Referencia Marshall. Esto se considera en un valor lo suficientemente aproximado, que verifica la metodología de moldeo especificada en su totalidad.

Tabla 5-14. Densidades de probetas dobles 1 a 12 y I a III, y su estadística
Fuente: elaboración propia

Probeta	Densidad (g/cm ³)	Estadístico	Resultado
1	2,385	Media	2,398
2	2,386	Error típico	0,002
3	2,390	Mediana	2,397
4	2,401	Moda	2,397
5	2,410	Desviación estándar	0,008
6	2,397	Varianza de la muestra	6,4695E-05
7	2,407	Curtosis	-0,97
8	2,391	Coefficiente de asimetría	0,11
9	2,397	Rango	0,025
10	2,410	Mínimo	2,385
11	2,394	Máximo	2,410
12	2,392	Cuenta	18
I	2,397	Coefficiente de variación	0,3%
II	2,403		
III	2,403		

Entonces, se toman las probetas cilíndricas con mordazas del tipo media caña, de aproximadamente 100 mm de diámetro. Se utiliza un juego de éstas para la base y otro para la capa de refuerzo. Cabe recordar que, dados los condicionantes de la presente tesis, al realizar esta tarea se separan los bordes internos de la mordaza una distancia de 30 mm en todas las muestras a analizarse. Esto permite la realización de los ensayos con interfases fresadas de hasta 10 mm de profundidad, motivo de análisis en las etapas posteriores de este estudio. En la Figura 5-9 se observan imágenes de una probeta colocada en las mordazas, junto con las planchuelas rígidas de vinculación a la prensa de ensayo.



Figura 5-9. Imágenes en vista y planta de una probeta doble con mordazas
Fuente: elaboración propia

Después, las probetas así armadas son colocadas en la prensa de ensayo, a una temperatura de 20 °C y en la posición que se observa en la Figura 5-10.



Figura 5-10. Probeta doble en posición de ensayo
Fuente: elaboración propia

Al realizar el ensayo, a la velocidad de avance de 1,27 mm/min especificada, se obtienen las curvas de tensión versus deformación que se observan en el monitor de la PC asociada a la prensa, Figura 5-11.

Mediante esta metodología se ensayan la totalidad de las probetas dobles moldeadas. Se logra en todos los casos la rotura de las mismas en el riego de liga de la interfase, según se observa en la Figura 5-12, correspondiente al ensayo de una probeta con la dotación de 0,3 l/m², a manera de ejemplo.

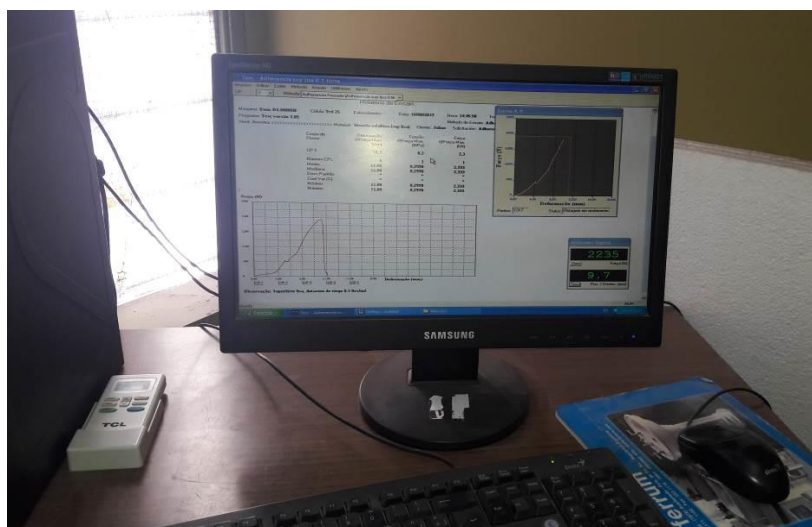


Figura 5-11. Curva tensión versus deformación durante el ensayo
Fuente: elaboración propia



Figura 5-12. Vistas de la rotura en la interfase de una probeta doble
Fuente: elaboración propia

Las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para las series de probetas ensayadas pueden observarse de la Figura 5-13 a la Figura 5-17, correspondientes a las dotaciones desde $0,0 \text{ l/m}^2$ a $0,4 \text{ l/m}^2$ respectivamente. Se hace notar que en la Figura 5-13 sólo se vuelca el resultado de 2 probetas, dado que la probeta 1 al ser ensayada no arrojó registro, por falencias en el ajuste inicial del equipo de ensayo, que fueron solucionadas de allí en adelante. Además, en las figuras puede verse como las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones. Este desplazamiento corresponde a una distancia de $4,0 \text{ mm}$ de deformación. De esta manera las gráficas pueden ser analizadas más fácilmente, por evitarse su superposición.

Al analizar la Figura 5-17, puede verse que la probeta II (CP2 en la gráfica) arroja un resultado por fuera de la tendencia y de los resultados de las otras dos probetas (I y III). Por esta razón, se decide dejar de lado a esta probeta y volcar los resultados en forma corregida (Figura 5-18).

Ahora bien, de los resultados obtenidos pueden observarse valores individuales bastante aproximados de tensión de corte máxima S_{max} en cada serie y una dispersión un poco más marcada en los valores de TD . A partir de éstos, pueden calcularse los valores promedios para cada serie, lo que permite confeccionar el resumen de resultados de la Tabla 5-15. Se puede confeccionar así la gráfica de tensión de corte máxima promedio S_{max} versus la dotación del riego de liga, que se observa en la Figura 5-19. Ésta, permite ver la ubicación del máximo valor de S_{max} alcanzable, que se encuentra en el entorno de $0,25 \text{ l/m}^2$ a $0,30 \text{ l/m}^2$ de la dotación del riego de liga.

Por ello, se efectúa la verificación de lo observado mediante el moldeo de las probetas IV a VI con $0,25 \text{ l/m}^2$ de dotación de riego de liga. En la Tabla 5-16 se expresan los cálculos de la dotación de emulsión a aplicarse en cada probeta. En la Figura 5-20 se observan las probetas dobles IV a VI moldeadas.

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 18/08/2017 Hora: 12:22:22 Trabalho nº 0695
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup lisa) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	14,4	0,3	2,2
CP 2	11,7	0,3	2,0
Número CPs	2	2	2
Média	13,03	0,2645	2,077
Mediana	13,03	0,2645	2,077
Desv. Padrão	1,885	0,01950	0,1532
Coef. Var. (%)	14,47	7,375	7,375
Mínimo	11,70	0,2507	1,969
Máximo	14,36	0,2783	2,186

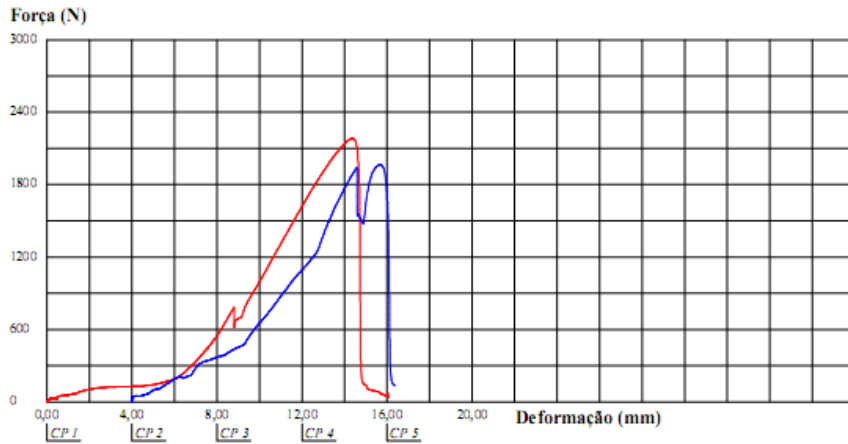


Figura 5-13. Resultados para las probetas con dotación 0,0 l/m²
 Fuente: elaboración propia

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 18/08/2017 Hora: 14:45:58 Trabalho nº 0697
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup lisa) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	11,1	0,3	2,3
CP 2	10,7	0,3	2,5
CP 3	11,6	0,3	2,3
Número CPs	3	3	3
Média	11,13	0,3004	2,359
Mediana	11,08	0,2970	2,333
Desv. Padrão	0,4273	0,01237	0,09718
Coef. Var. (%)	3,840	4,119	4,119
Mínimo	10,73	0,2900	2,278
Máximo	11,58	0,3141	2,467

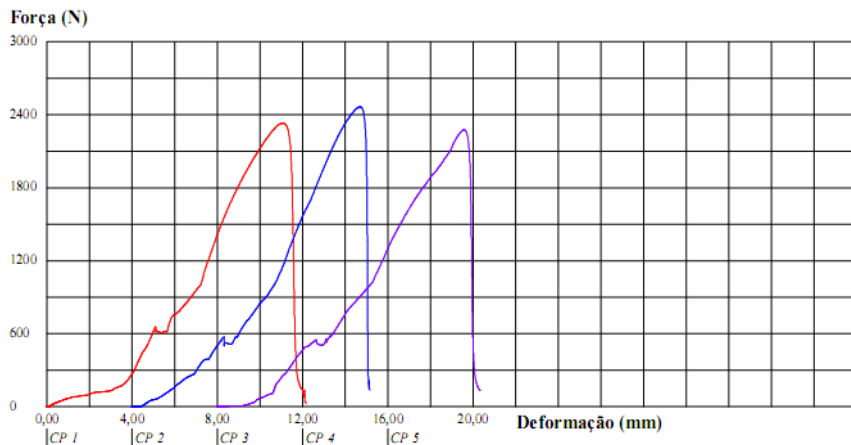


Figura 5-14. Resultados para las probetas con dotación 0,1 l/m²
 Fuente: elaboración propia

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 01/09/2017 Hora: 10:41:15 Trabalho n° 0703
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup lisa) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	11,1	0,3	2,5
CP 2	8,9	0,2	1,6
CP 3	11,6	0,3	2,3
Número CPs	3	3	3
Média	10,55	0,2713	2,131
Mediana	11,13	0,2900	2,278
Desv. Padrão	1,407	0,05552	0,4361
Coef. Var. (%)	13,34	20,46	20,46
Mínimo	8,946	0,2089	1,641
Máximo	11,58	0,3151	2,475

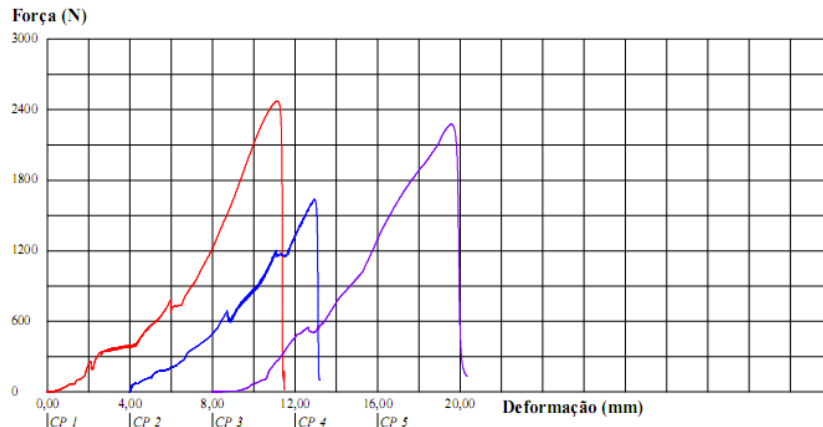


Figura 5-17. Resultados para las probetas con dotación 0,4 l/m²
 Fuente: elaboración propia

Máquina: Emic DL3000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 01/09/2017 Hora: 10:41:15 Trabalho n° 0703
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup lisa) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	11,1	0,3	2,5
CP 2	11,6	0,3	2,3
Número CPs	2	2	2
Média	11,35	0,3026	2,376
Mediana	11,35	0,3026	2,376
Desv. Padrão	0,3198	0,01772	0,1392
Coef. Var. (%)	2,817	5,857	5,857
Mínimo	11,13	0,2900	2,278
Máximo	11,58	0,3151	2,475

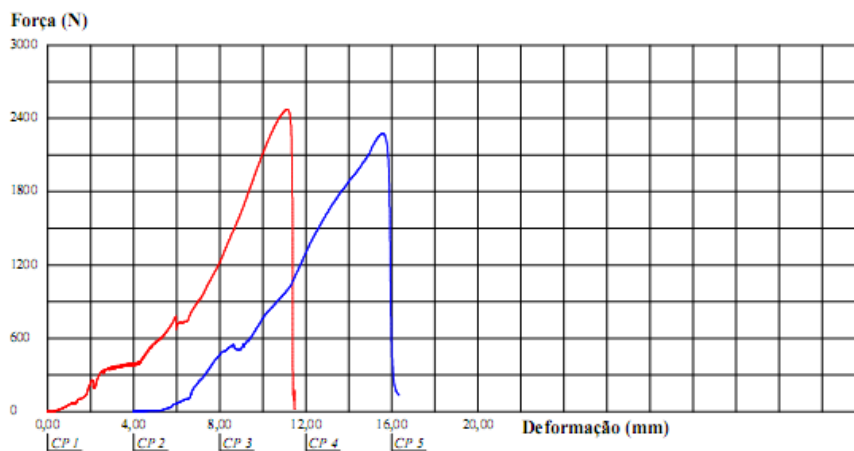


Figura 5-18. Resultados para las probetas con dotación 0,4 l/m² corregidos
 Fuente: elaboración propia

Tabla 5-15. Valores promedio obtenidos versus dotación de riego de liga
Fuente: elaboración propia

Dotación (l/m ²)	<i>S</i> _{max} (MPa)	<i>TD</i> (mm)
0,0	0,268	13,0
0,1	0,300	11,1
0,2	0,318	9,9
0,3	0,327	10,1
0,4	0,303	11,3

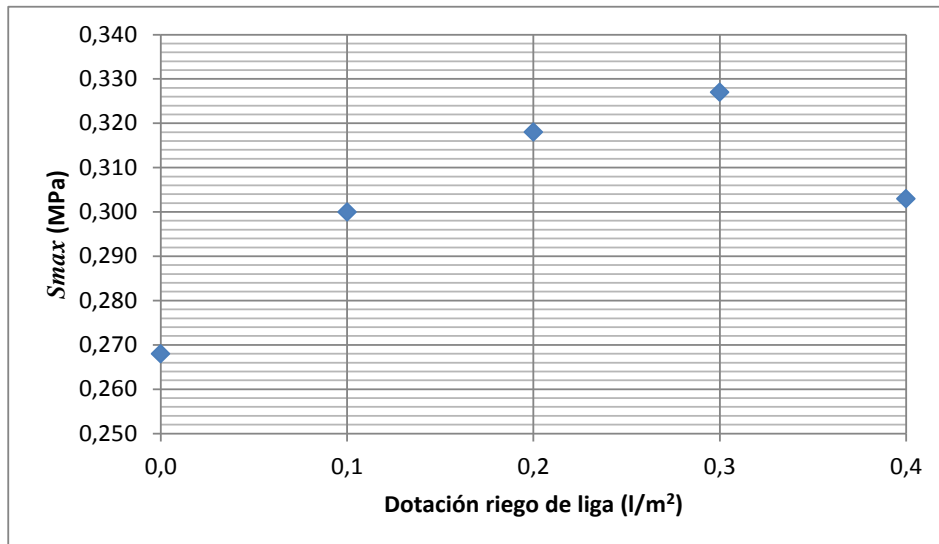


Figura 5-19. Curva *S*_{max} promedio versus dotación de riego de liga
Fuente: elaboración propia



Figura 5-20. Probetas dobles IV a VI moldeadas
Fuente: elaboración propia

Tabla 5-16. Cálculo de dotación de emulsión para probetas IV a VI
Fuente: elaboración propia

PROBETAS	DOTACION RESIDUO (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)
IV a VI	0,25	395,6	3,1

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm ²):	78,5
AREA (m ²):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%

De la serie de 3 probetas dobles, la probeta VI registra un fallo en el registro de datos del equipo durante la realización del ensayo, razón por la cual se cuenta con los resultados de 2 probetas, los cuales se observan en la Figura 5-21.

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensómetro: - Data: 11/09/2017 Hora: 11:34:34 Trabajo n° 0704
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup lisa) Cliente: Julian Solución: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP1	11,8	0,3	2,6
CP2	10,3	0,3	2,5
Número CPs	2	2	2
Média	11,04	0,3254	2,556
Mediana	11,04	0,3254	2,556
Desv Padrão	1,027	0,001962	0,01541
Coef Var (%)	9,302	0,6030	0,6030
Mínimo	10,32	0,3240	2,545
Máximo	11,77	0,3268	2,567

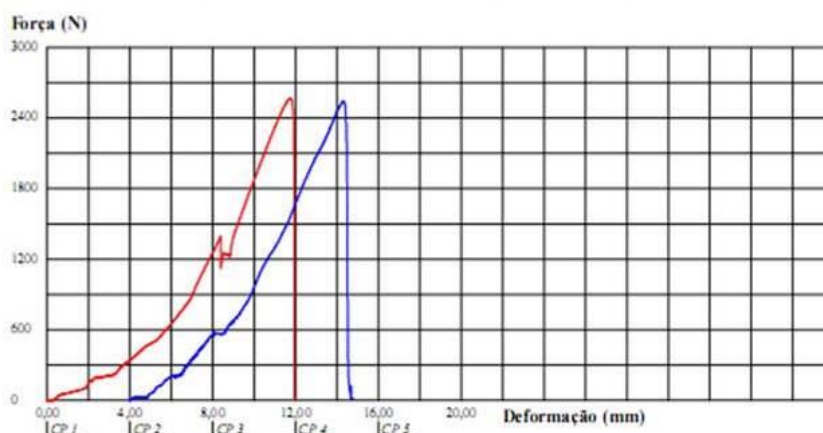


Figura 5-21. Resultados para las probetas con dotación 0,25 l/m²
Fuente: elaboración propia

Con estos resultados se puede conformar la Tabla 5-17, donde se observa el valor de *S_{max}* en el rango de lo previsto. Si bien este resultado es sensiblemente similar al obtenido con 0,30 l/m², se decide establecer a 0,25 l/m² como la dotación óptima por implicar un menor consumo de emulsión ante respuestas comparables.

Tabla 5-17. Valores obtenidos con la dotación de 0,25 l/m² de riego de liga
Fuente: elaboración propia

Dotación (l/m ²)	Probeta	<i>S_{max}</i> (MPa)	<i>TD</i> (mm)
0,25	IV	0,327	11,8
	V	0,324	10,3
	Prom	0,325	11,0

Dado que la especificación técnica aplicable en la jurisdicción nacional establece una S_{max} de 0,7 MPa de acuerdo al Ensayo de SBT (o denominado como Ensayo Leutner en algunas publicaciones) (DNV, 2017), que posee diferentes características que el aplicado para el estudio, surge la duda acerca de si los resultados obtenidos son comparables en tal sentido.

Por ello, vale la pena considerar lo observado por Berenguer et al. (2017) respecto a lo especificado en España. Allí, con la modificación del Artículo 531 del Pliego General de Especificaciones (PG-3) de diciembre de 2014, se establece la necesidad de realizar ensayos de adherencia entre capas según la norma NLT-382 (CEDEX, 2008). La misma establece que, cuando una de las capas sea de rodadura, se debe verificar que la resistencia al esfuerzo cortante supere el valor de 0,60 MPa. Además, permite el uso de dos dispositivos de corte diferentes (A y B), sin establecer datos de equivalencia de los resultados obtenidos. En el dispositivo A la carga se aplica mediante una mordaza de dos cuerpos, contenida en un plano perpendicular al testigo-probeta, sobre el que se aplica un esfuerzo de corte puro en la interfase de las dos capas. O sea, se trata de una versión del Ensayo de SBT. El dispositivo B, por su parte, consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en la que se introduce el testigo-probeta. El conjunto se coloca en posición horizontal sobre una base con dos puntos de apoyo separados 188 mm. La interfase queda a 5 mm de la mordaza y el punto de apoyo del conjunto. De esta manera, actúa como una viga biapoyada, en la cual la sección de ensayo está sometida a esfuerzo cortante. Por lo expresado, se deduce se trata del Ensayo de LCB, descrito en el Anexo B.

Se ve así que la diferencia entre ambos ensayos es que en el dispositivo A se mantiene el rozamiento en el plano de rotura mientras se realiza el ensayo; rozamiento que puede aumentar por la forma de aplicar la carga. En el dispositivo B, en cambio, resulta más fácil la separación de ambas capas una vez que se inicia por esfuerzo cortante su deslizamiento y despegue. En función de los resultados obtenidos por Berenguer et al. (2017) al aplicar ambos dispositivos para un mismo caso de materiales típicos españoles, se ha determinado que conducen a diferentes resistencias al esfuerzo de corte. El análisis de dichos resultados presenta valores promedios un 20 % mayores con el dispositivo A, respecto de los del dispositivo B.

Lo señalado resulta de interés si se requiere deducir cuál sería la resistencia al corte alcanzable con los materiales empleados en la experiencia y con la dotación de riego de liga de 0,25 l/m² con el Ensayo de SBT, o un análisis análogo.

Otro aspecto de interés se encuentra en que el Ensayo de SBT especificado por DNV requiere la solicitación de testigos de 150 mm de diámetro, según puede observarse en la Figura 5-22.

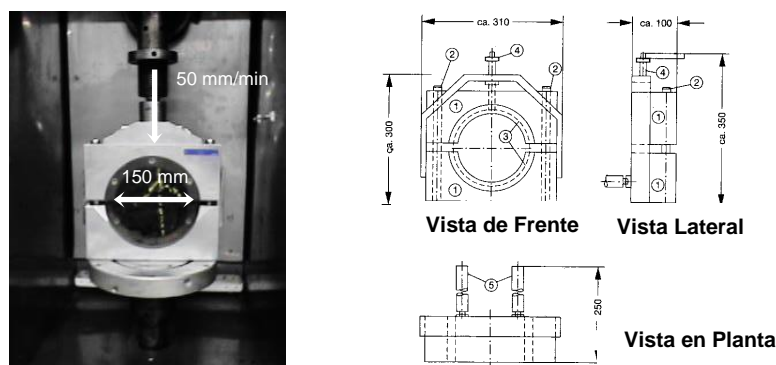


Figura 5-22. Vistas del Ensayo de SBT
Fuente: Sangiorgi, 2002 (traducción propia).

En tal sentido, Monser et al. (2010) denuncian haber realizado un ensayo análogo, mediante lo establecido por la norma alemana ZTV SIB 90. Ésta contempla el empleo probetas de 100 mm de diámetro y utiliza el dispositivo que se ve en la Figura 5-23. Cabe mencionar que las especificaciones alemanas establecen como requisito a partir de este ensayo una resistencia S_{max} mínima en las interfaces de 0,85 MPa.



Figura 5-23. Ensayo según norma alemana
Fuente: Monser et al., 2010 (traducción propia).

Además, Solano et al. (2017) también dan cuenta de trabajos realizados en tal sentido. En éstos, al utilizar un dispositivo de prueba análogo al del Ensayo SBT, han logrado resultados comparables con especímenes de prueba de 100 mm y 150 mm de diámetro. Cabe señalar que la norma española NLT-382 establece el ensayo indistinto de especímenes de 100 mm y 150 mm de diámetro (CEDEX, 2008).

Puede deducirse entonces que:

- El valor establecido por DNV de 0,70 MPa, de resistencia mínima al corte empleando el Ensayo de SBT sobre testigos extraídos de obra, no coincide exactamente con lo especificado por reparticiones actuantes en otros países. Se ha relevado exigencias por debajo y encima de este valor.
- El resultado obtenible mediante otros ensayos de corte puro puede variar sustancialmente de lo obtenible con la sistemática del Ensayo de SBT.
- El empleo de probetas de diámetro de 100 mm debería llevar a resultados comparables al empleo de probetas de 150 mm de diámetro.

Dado todo lo expresado, para establecer si los resultados obtenidos mediante el procedimiento diseñado para llevar adelante esta tesis son representativos de una solución adecuada para su aplicación en obra, se decide realizar ensayos complementarios a tal fin. Los mismos se efectúan mediante el equipo de Ensayo de LCB disponible en el LEMaC, sobre probetas dobles de 100 mm de diámetro, a una velocidad de 2,5 mm/min y una temperatura de 20 °C, según lo establecido por la norma, lo cual desde un principio hace presuponer la obtención de mayores S_{max} que los obtenidos cuando se realizaron los ensayos con el procedimiento diseñado a una velocidad de 1,27 mm/min. Los resultados así obtenidos, son luego incrementados en un 20 % para compararlos a los resultados obtenibles mediante el Ensayo de SBT.

Una primera alternativa de ensayo es mediante instrumental que permita la obtención de la curva de carga versus deformación de manera continua. Para ello, se emplea una celda de carga y un extensómetro digital (LVDT de su sigla en inglés). La segunda alternativa se tiene cuando se lo usa en pruebas que no requieren establecer el área bajo la curva de deformación. Por ello, se lo puede adaptar a instrumentos que

permitan registrar sólo el máximo esfuerzo de corte y la deformación para la cual éste se logra. En esta opción, puede simplificarse el equipo al usar un aro dinamométrico y un flexímetro mecánico. Dado que en esta parte de la tesis se está buscando sólo obtener resultados que permitan el análisis comparativo descripto, se opta por la segunda alternativa. En la Figura 5-24 se observa el esquema del equipamiento utilizado en esta experiencia.

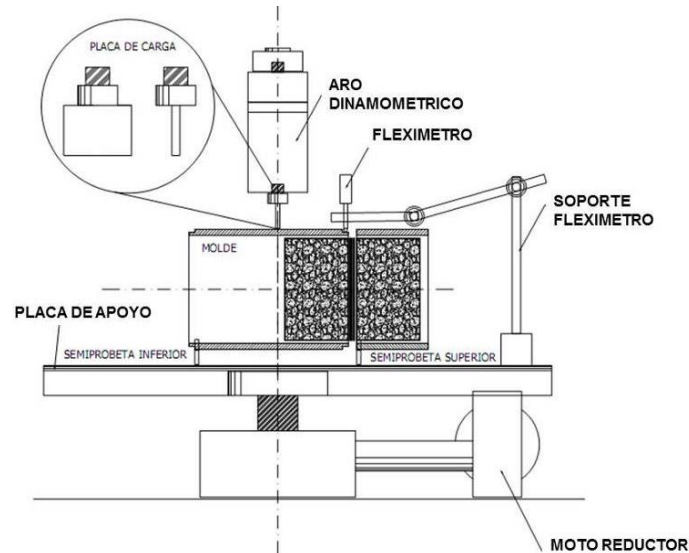


Figura 5-24. Esquema del Ensayo de LCB adaptado a esta experiencia
Fuente: Ricci, 2011 (adaptación propia)

El cálculo de la S_{max} se realiza por medio de la aplicación de la Ecuación 5-2.

$$S_{max} = \frac{P/2}{A} = \frac{P/2}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (5-2)$$

Donde:

- S_{max} = resistencia a las tensiones tangenciales [MPa]
- P = carga aplicada [N]
- A = área transversal de la probeta [mm²]

En dicha experiencia se moldean las probetas dobles A, B y C mediante los procedimientos ya descriptos y con la dotación de riego de liga de 0,25 l/m² en análisis; las que se pueden observar en la Figura 5-25.

Las mismas se ensayan y se obtiene los resultados que se observan en la Tabla 5-18. En la Figura 5-26 se ve una imagen durante la realización de los ensayos y en la Figura 5-27 las probetas dobles una vez ensayadas, en las cuales la rotura se ha producido en la interfase.

De acuerdo a los resultados obtenidos de S_{max} , puede deducirse que se trata de una situación que implica el cumplimiento de los valores establecidos por el pliego de DNV. Se ratifica así la dotación de riego de liga de referencia de 0,25 l/m². Además, se confirma que los resultados de S_{max} obtenidos mediante el procedimiento de ensayo desarrollado para esta experiencia, sólo deben ser tomados a nivel de una comparación relativa entre sí.

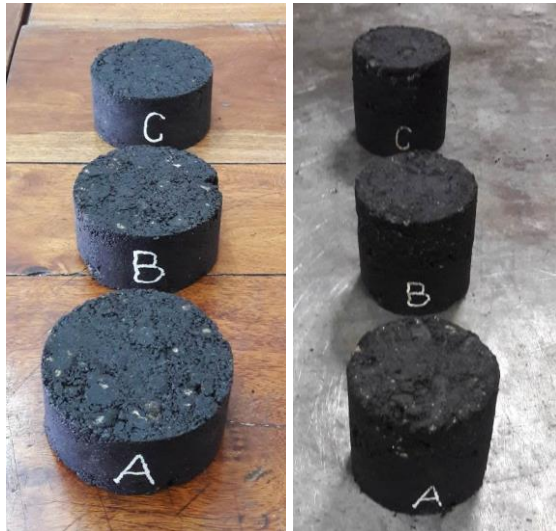


Figura 5-25. Bases y probetas dobles A, B y C
Fuente: elaboración propia

Tabla 5-18. Resultados obtenidos con las probetas A a C mediante el Ensayo de LCB
Fuente: elaboración propia

Dotación óptima (l/m^2):

PROBETAS	CARGA (kg)	S_{max} por LCB (MPa)	S_{max} corregida SBT (MPa)	TD (mm)
A	1250	0,772	0,926	1,6
B	1218	0,752	0,902	1,9
C	1169	0,721	0,866	1,7

$S_{max\ prom}$ (MPa):
 TD_{prom} (mm):



Figura 5-26. Realización del Ensayo de LCB
Fuente: elaboración propia



Figura 5-27. Probetas dobles ensayadas mediante el Ensayo de LCB
Fuente: elaboración propia

Por su parte, algo similar pasa con el parámetro TD , debido a que los resultados obtenidos mediante el Ensayo LCB son notoriamente menores a los logrados con el procedimiento desarrollado. Además, éstos resultan cercanos a los registrados en experiencias análogas efectuadas con anterioridad en el LEMaC y con materiales de referencia similares; como es el caso de los trabajos de Ricci (2011). Por lo expresado los resultados de TD alcanzados con el procedimiento desarrollado deben sólo tomarse para una comparación relativa entre sí.

Referencias

BERENGUER, J.M., CALVO, C., MOLINA, J., GOMARIZ, R., PEÑA, J.L., “El ensayo de adherencia de capas de firme según NLT-328/08. Estudio comparativo de los resultados obtenidos con los dispositivos A y B”, XIX Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.

BOLZAN, P., “SHRP-2 Renovación de pavimentos”, Revista Vial, ISSN 0329-1146, noviembre-diciembre, n° 112, pp 44-49, Argentina, 2016.

CEDEX, “NLT-382/08 Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte”, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, ISBN 978-84-7780-484, España, 2008.

CPA, “Proyecto de pliego de especificaciones técnicas generales para mezclas asfálticas en caliente gruesas”, Comisión Permanente del Asfalto, Argentina, 2015. [Consultado en julio de 2017 en: <http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/licitaciones/952/documentacion-adicional/CPA%202015%20Gruesas.pdf>]

DNV, “Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos”, Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_1.pdf]

GIOVANON, O., BUONO, F., "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.

IRAM, "IRAM 6691 Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas convencionales", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2008.

LEMaC, "Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC - Centro de Investigaciones Viales (edición 2016)", Editorial edUTecNe (ISBN 978-987-1896-51-6), Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2016.

MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M.J., "Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012.

MERCADO, R., BRACHO, C., AVENDAÑO, J., "Emulsiones asfálticas, usos y rompimiento", Universidad de los Andes, Cuaderno FIRP S 365-A, Venezuela, 2008.

MONSER, C.A., MONTESTRUQUE, G.E., SILVA, A.E.F., "Evaluation of an airport pavement after almost 8 years of overlay rehabilitation with a polyester asphalt reinforcement", 9^o International Conference on Geosynthetics, Brasil, 2010.

RICCI, L.A., "Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético", Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.

SANGIORGI, C., COLLOP, A.C., THOM, N.H., "Laboratory assessment of bond condition using the Leutner Shear Test", 3rd International Conference Bituminous Mixtures and Pavements", Thessaloniki, Grecia, 2002.

SOLANO, M., LEIVA, P., LORIA, L., "Dosificación de emulsión asfáltica en sobrecapas asfálticas con geosintéticos", XIX Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.

VARGAS, J.P., TORRES, O.L., "Evaluación de la resistencia al corte en la interfaz de capas asfálticas reforzadas con geomallas", XIX Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.

WHITE, G., "Asphalt overlay bond strength", Australian Airports Association, Aircraft Pavement and Lighting Conference, Australia, 2015.

ZHANG, N., ZHENG, N.X., CONG, Z.H., "Influencing factors on bonding layer performance effect between the ultra-thin surface", Functional Pavement Design (ISBN 978-1-138-02924-8), Proceedings of the 4^o Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design, CEW 2016, Netherlands, 2016.

6. ANÁLISIS MEDIANTE ENSAYOS EN CASOS CON SUPERFICIES FRESADAS

Dada la dotación óptima de riego de liga establecida para la interfase de superficies lisas entre las capas en estudio, resta ahora efectuar el análisis para las superficies fresadas desde el punto de vista mecánico. En tal sentido, se verifica si en el caso de estas últimas resulta efectivamente necesario aumentar la dotación en forma proporcional al incremento de área generado por la textura resultante después del fresado. Esta duda surge, entre otros aspectos, porque es probable que un incremento excesivo en la dotación del riego de liga no se distribuya en forma homogénea sobre la superficie fresada. Lo afirmado puede registrarse cuando la fuerza de gravedad y el grado de fluidez de la emulsión generan un depósito de mayor espesor en el valle de los surcos. Lo señalado se esquematiza en la Figura 6-1.

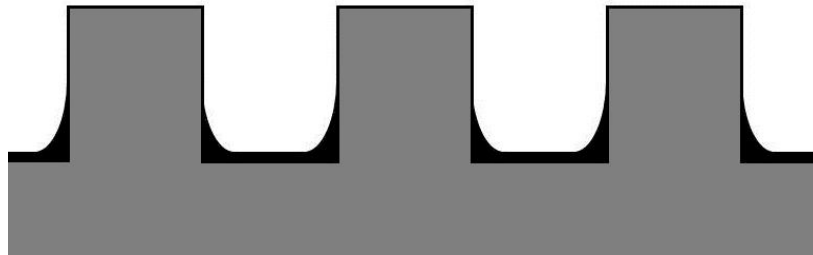


Figura 6-1. Exceso de riego de liga sobre una superficie fresada
Fuente: elaboración propia

Por lo expresado, se procede a someter una probeta correspondiente al Caso 3 a la simulación del fresado. Luego, se aplica sobre ésta con pincel la dotación de riego de liga aumentada en la misma proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado. Paso seguido, la probeta es seccionada mediante su aserrado con una hoja diamantada. Finalmente, una de las secciones así lograda se somete a estudio. Para ello, se emplea la lupa Olympus SZ61 con un aumento aproximado de 45x, que se ve en la Figura 6-2. Mediante esta técnica se logran imágenes como las de la Figura 6-3.



Figura 6-2. Análisis con lupa de la sección generada
Fuente: elaboración propia

Se puede ver en las imágenes de la Figura 6-3, como la hipótesis de distribución del riego efectuada, al menos en lo que hace a las experiencias en laboratorio, tendría un

grado de validez, ya que resulta claro que la deposición del mismo en los valles del fresado resulta superior a la que se obtiene en sus crestas.



Figura 6-3. Disposición del riego lograda en laboratorio
Fuente: elaboración propia

Entonces, para efectuar el análisis de cómo esta situación influye desde el punto de vista mecánico y en cuanto a cuál sería en tal sentido la situación óptima, se decide a partir del contenido óptimo de riego de liga de $0,25 \text{ l/m}^2$, determinado para los materiales empleados en esta experiencia, estudiar cuatro situaciones; a saber:

- Situación 1: dotación de riego de liga óptima incrementada en la misma proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.
- Situación 2: dotación de riego de liga óptima incrementada en $2/3$ de la proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.
- Situación 3: dotación de riego de liga óptima incrementada en $1/3$ de la proporción del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.
- Situación 4: dotación de riego de liga óptima sin considerar el incremento del área de contacto en la interfase por el fresado.

Se vuelcan a continuación los condicionantes adoptados y los resultados obtenidos para estas situaciones en estudio.

6.1. Análisis de respuesta al corte para la Situación 1

Para analizar esta situación, debe estimarse la dotación de riego a ser aplicada mediante el coeficiente *CIA* establecido en la Ecuación 4-6. A partir de ese coeficiente puede calcularse la Dotación de Riego Incrementada (*DRI*), en función de una Dotación de Riego (*DR*) y mediante la aplicación de la Ecuación 6-1.

$$DRI = CIA \cdot DR \quad (6-1)$$

En la Tabla 6-1 se pueden observar los incrementos en las dotaciones a ser empleadas bajo este criterio, calculados a partir de los ensayos ya descritos efectuados sobre las probetas confeccionadas con el fresado simulado y el modelo desarrollado a partir de las simulaciones numéricas.

A partir de estos coeficientes, la superficie de las probetas dobles a ser moldeadas, la dotación óptima para superficies lisas de $0,25 \text{ l/m}^2$ y las características de la emulsión empleada, se realizan los cálculos de la Tabla 6-2 para arribar al peso de emulsión a aplicarse en cada probeta.

Tabla 6-1. CIA a ser utilizados en los ensayos de corte en la Situación 1

Fuente: elaboración propia

Caso	CIA	DPA (cm)
1	1,363	24,2
2	1,479	19,8
3	1,612	16,1
4	1,760	13,0
5	1,841	11,6
6	1,945	10,2

Tabla 6-2. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 1

Fuente: elaboración propia

Dotación óptima (l/m²):

0,25

PROBETAS	CIA	DOTACION CORREGIDA (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)
13 a 15	1,363	0,34	539,3	4,2
16 a 18	1,479	0,37	585,0	4,6
19 a 21	1,612	0,40	637,6	5,0
22 a 24	1,760	0,44	696,2	5,5
25 a 27	1,841	0,46	728,4	5,7
28 a 30	1,945	0,49	769,4	6,0

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm ²):	78,5
AREA (m ²):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%

Luego, se moldean las probetas dobles a ser analizadas. Se utiliza para ello el procedimiento diseñado. Se busca de este modo establecer, en los 6 casos de simulación de fresado, las respuestas ante los ensayos de corte directo instrumentados. Por ello, se emplean los incrementos de riego calculados como necesarios. Además, se establece un número de 3 probetas por Caso y se procede a moldear las 18 probetas de base a ser analizadas (probetas 13 a 30). Éstas pueden observarse en la Figura 6-4.



Figura 6-4. Base de las probetas dobles 13 a 30

Fuente: elaboración propia

A dichas probetas se les determina su Densidad Marshall. Se obtienen los resultados que se vuelcan en la Tabla 6-3, junto con el correspondiente resumen estadístico. Por

esta vía se confirma la tendencia a la distribución normal en sus resultados y lo acotado de su dispersión. Además, se observa que la Densidad Media de esta serie de probetas se ubica en un 99,7 % respecto de la Densidad de Referencia Marshall, lo cual se considera en un valor lo suficientemente aproximado, que verifica nuevamente la metodología de moldeo especificada.

Tabla 6-3. Densidades de bases de probetas 13 a 30, y su estadística
Fuente: elaboración propia

Probeta	Densidad (g/cm ³)	Estadístico	Resultado
13	2,402	Media	2,404
14	2,392	Error típico	0,002
15	2,399	Mediana	2,401
16	2,401	Moda	2,399
17	2,409	Desviación estándar	0,008
18	2,401	Varianza de la muestra	6,7046E-05
19	2,400	Curtosis	-0,78
20	2,396	Coefficiente de asimetría	0,68
21	2,398	Rango	0,027
22	2,404	Mínimo	2,392
23	2,399	Máximo	2,419
24	2,409	Cuenta	18
25	2,397	Coefficiente de variación	0,3%
26	2,417		
27	2,415		
28	2,419		
29	2,399		
30	2,417		

Paso seguido se procede al aserrado superficial de las probetas, de acuerdo a los parámetros ya establecidos para los 6 casos de simulación. En la Figura 6-5 se observa el proceso de aserrado de una probeta correspondiente al Caso 1 y en la Figura 6-6 se observa al aserrado de una probeta correspondiente al Caso 5. Las probetas una vez aserradas se observan en la Figura 6-7.



Figura 6-5. Aserrado de una probeta del Caso 1
Fuente: elaboración propia



Figura 6-6. Aserrado de una probeta del Caso 5
Fuente: elaboración propia



Figura 6-7. Probetas 13 a 30 aserradas
Fuente: elaboración propia

Para profundizar el análisis comparativo de los perfiles generados se elabora la Figura 6-8 con imágenes de detalle de los 6 casos en planta y en perfil. Se pueden ver en la imagen desde el Caso 1 en la parte superior hasta el Caso 6 en la parte inferior. Cabe aclarar que las imágenes en planta poseen entre si una misma escala, al igual que las imágenes correspondientes al perfil.

Paso seguido, se aplica el riego de liga sobre la superficie fresada de las probetas. En la Figura 6-9 se observa la aplicación de este paso en los casos extremos 1 y 6.

Luego del correspondiente curado se procede al moldeo de las probetas dobles que se observan en la Figura 6-10, siguiendo el procedimiento ya descrito oportunamente.

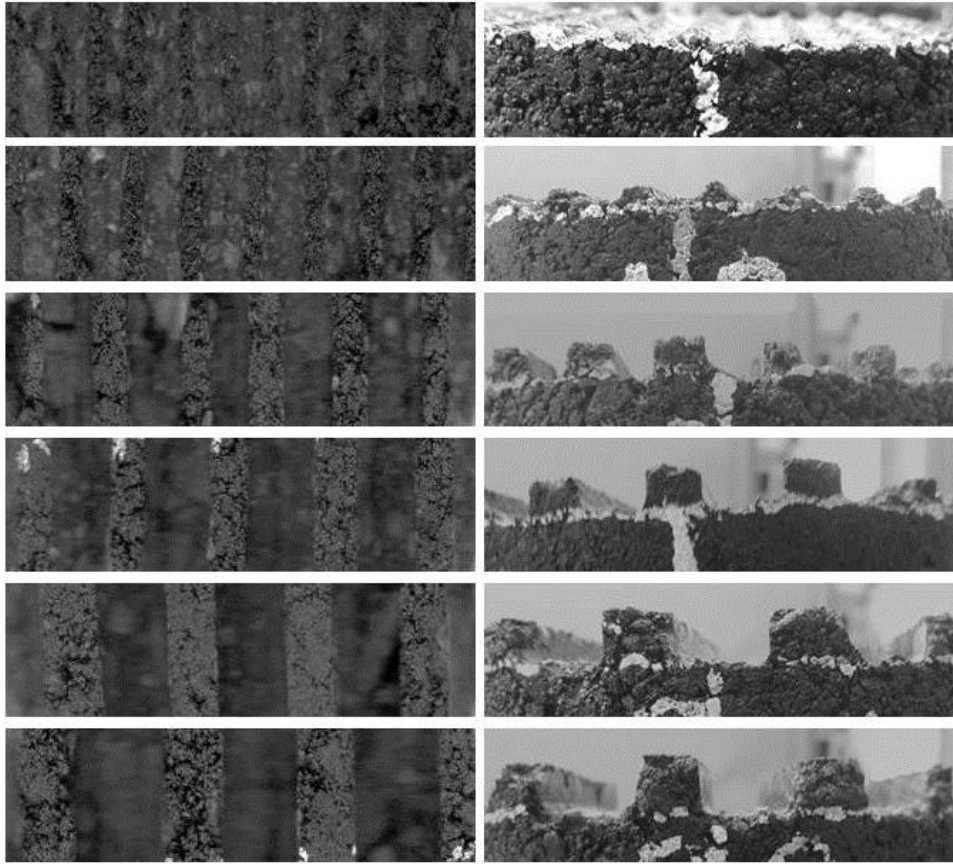


Figura 6-8. Imágenes en planta y perfil de los 6 casos simulados
Fuente: elaboración propia



Figura 6-9. Aplicación del riego sobre las probetas fresadas
Fuente: elaboración propia

Nuevamente, como en el caso de las bases, a dichas probetas se les determina su Densidad Marshall. Se obtienen así los resultados que se vuelcan en la Tabla 6-4, junto con el correspondiente resumen estadístico. De esta manera, se confirma la tendencia a la distribución normal en los resultados y lo acotado de su dispersión. Se obtiene para estas probetas una Densidad Media de un 99,9 % de la registrada para las bases y de un 99,6 % respecto de la Densidad de Referencia Marshall. Estos valores verifican la metodología de moldeo especificada. Dado que lo citado se ha registrado para los casos extremos de las probetas dobles con superficie lisa y las

probetas dobles con la máxima dotación de manera proporcional al incremento de la superficie en la interfase, se considera totalmente verificada la forma de moldeo adoptada, por lo que de aquí en más para el resto de las probetas moldeadas no se vuelcan los resultados de Densidad Marshall obtenidos.



Figura 6-10. Probetas dobles 13 a 30
Fuente: elaboración propia

Como la flexión principal del pavimento se da en su sentido longitudinal y el fresado presenta su superficie dentada también en este sentido, se decide efectuar los ensayos con la probeta doble dispuesta de acuerdo a la orientación que puede observarse en la Figura 6-11.

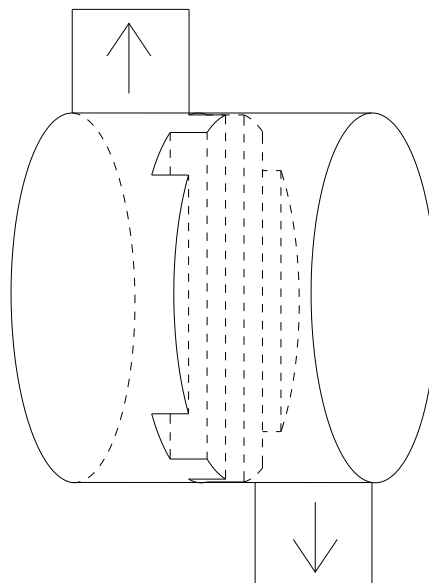


Figura 6-11. Orientación del fresado en el ensayo
Fuente: elaboración propia

Tabla 6-4. Densidades de probetas dobles 13 a 30, y su estadística
Fuente: elaboración propia

Probeta	Densidad (g/cm ³)	Estadístico	Resultado
13	2,397	Media	2,402
14	2,390	Error típico	0,001
15	2,400	Mediana	2,4005
16	2,398	Moda	2,397
17	2,403	Desviación estándar	0,006
18	2,408	Varianza de la muestra	3,5007E-05
19	2,399	Curtosis	-0,35
20	2,396	Coefficiente de asimetría	0,18
21	2,400	Rango	0,023
22	2,401	Mínimo	2,390
23	2,403	Máximo	2,413
24	2,403	Cuenta	18
25	2,397	Coefficiente de variación	0,2%
26	2,409		
27	2,413		
28	2,409		
29	2,397		
30	2,409		

Paso seguido, se ensayan las probetas dobles de acuerdo al procedimiento establecido, produciéndose la rotura de la mayoría de las probetas en el riego de liga, lo cual puede observarse en la Figura 6-12 a la Figura 6-17. En dichas imágenes se señala como BASE a la capa inferior fresada de la probeta doble y como REVESTIMIENTO a la superior.

Las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para las series de probetas ensayadas pueden observarse de la Figura 6-18 a la Figura 6-23, correspondientes a los Casos 1 a 6, respectivamente. En las figuras puede verse como las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones, una distancia correspondiente a los 4,0 mm de deformación, de forma tal que puedan ser analizadas más fácilmente al evitarse su superposición. Se observa en la Figura 6-20, perteneciente al Caso 3, la ausencia de la curva de ensayo de la probeta 21, debido a una falla en la adquisición de datos durante su ensayo. Por esta razón, los valores promedios de resultados se obtienen a partir de las dos probetas restantes, en las cuales no se han registrado inconvenientes.

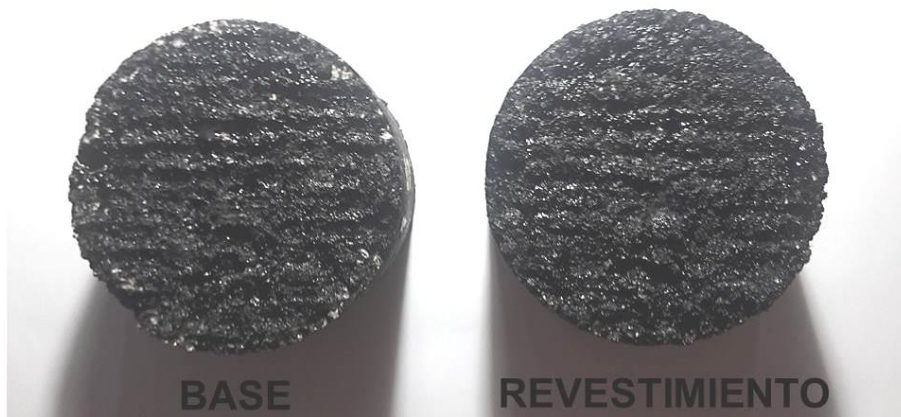


Figura 6-12. Superficie de corte, probeta Caso 1
Fuente: elaboración propia

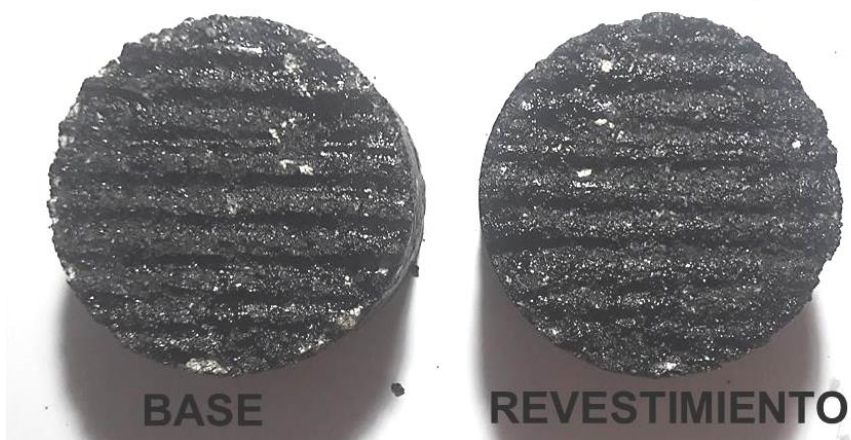


Figura 6-13. Superficie de corte, probeta Caso 2
Fuente: elaboración propia



Figura 6-14. Superficie de corte, probeta Caso 3
Fuente: elaboración propia

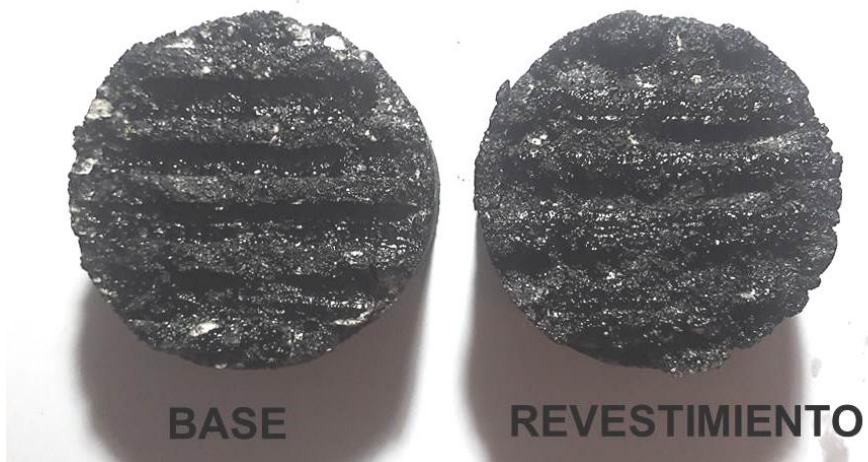


Figura 6-15. Superficie de corte, probeta Caso 4
Fuente: elaboración propia

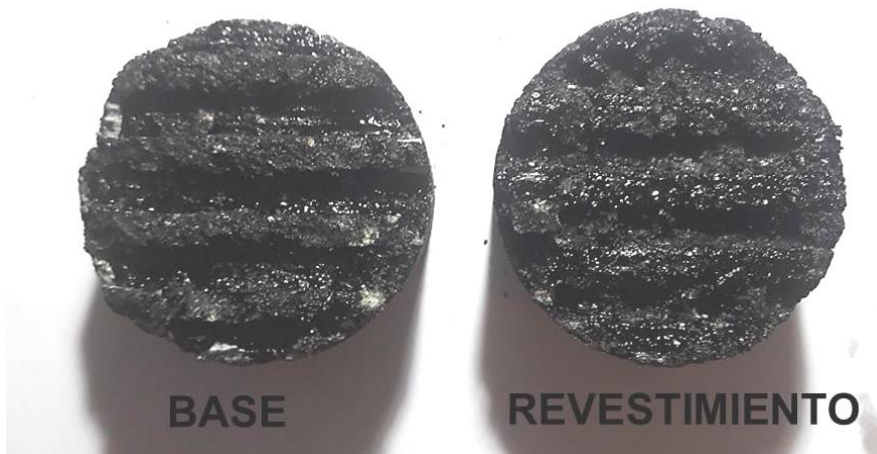


Figura 6-16. Superficie de corte, probeta Caso 5
Fuente: elaboración propia



Figura 6-17. Superficie de corte, probeta Caso 6
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D1.30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/09/2017 Hora: 09:52:21 Trabalho n° 0705
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	9,4	0,2	1,7
CP 2	8,1	0,2	1,2
CP 3	5,3	0,2	1,5
Número CPs	3	3	3
Média	7,599	0,1874	1,472
Mediana	8,067	0,1941	1,524
Desv.Padrão	2,071	0,03265	0,2564
Coef.Var.(%)	27,25	17,43	17,43
Mínimo	5,334	0,1519	1,193
Máximo	9,395	0,2161	1,697

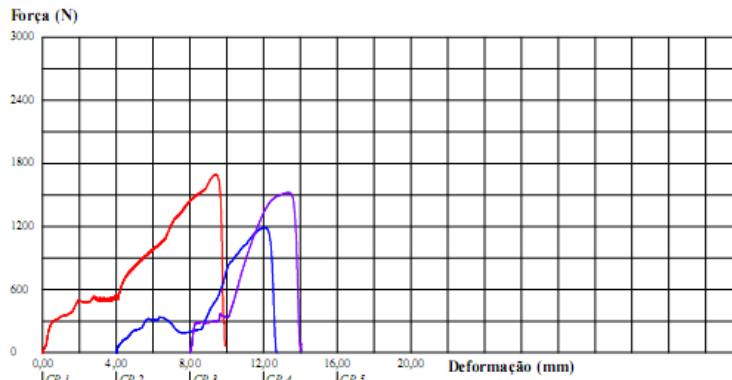


Figura 6-18. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 1
 Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D1.30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/09/2017 Hora: 12:48:42 Trabalho n° 0706
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	5,7	0,2	1,5
CP 2	4,5	0,3	2,2
CP 3	3,3	0,2	1,6
Número CPs	3	3	3
Média	4,512	0,2268	1,781
Mediana	4,481	0,2083	1,636
Desv.Padrão	1,180	0,04863	0,3819
Coef.Var.(%)	26,16	21,44	21,44
Mínimo	3,348	0,1901	1,493
Máximo	5,708	0,2820	2,215

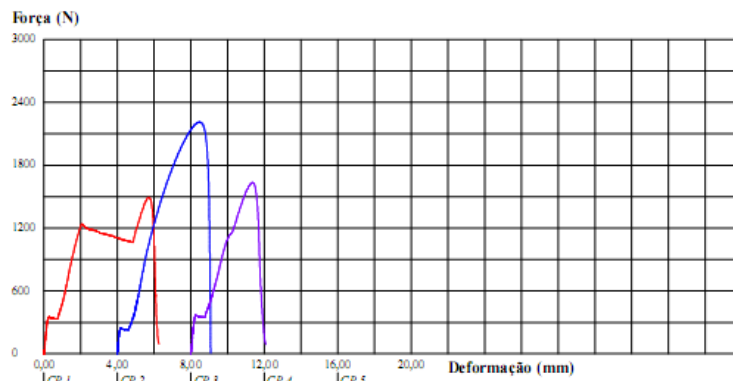


Figura 6-19. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 1
 Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 28/09/2017 Hora: 08:48:59 Trabalho n° **0708**
 Programa: Tesc versão 3,05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	4,2	0,2	1,9
CP 2	7,6	0,2	1,8
Número CPs	2	2	2
Média	5,944	0,2348	1,844
Mediana	5,944	0,2348	1,844
Desv.Padrão	2,407	0,005173	0,04063
Coef.Var.(%)	40,50	2,203	2,203
Mínimo	4,241	0,2312	1,816
Máximo	7,646	0,2385	1,873

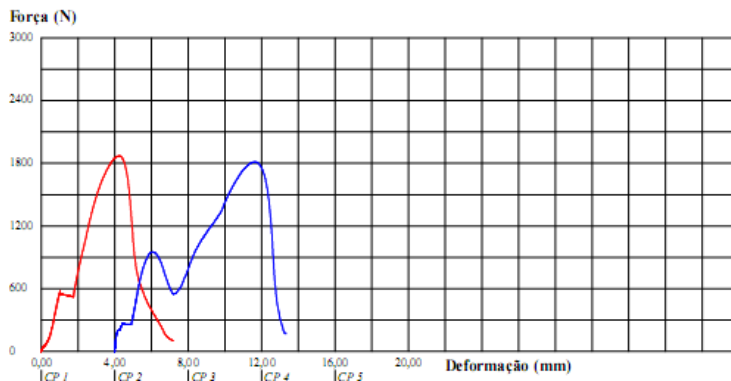


Figura 6-20. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 1
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 28/09/2017 Hora: 09:35:55 Trabalho n° **0709**
 Programa: Tesc versão 3,05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	3,3	0,2	1,9
CP 2	6,3	0,2	1,5
CP 3	6,1	0,2	1,6
Número CPs	3	3	3
Média	5,213	0,2137	1,678
Mediana	6,085	0,2075	1,630
Desv.Padrão	1,670	0,02570	0,2018
Coef.Var.(%)	32,04	12,03	12,03
Mínimo	3,288	0,1916	1,505
Máximo	6,267	0,2419	1,900

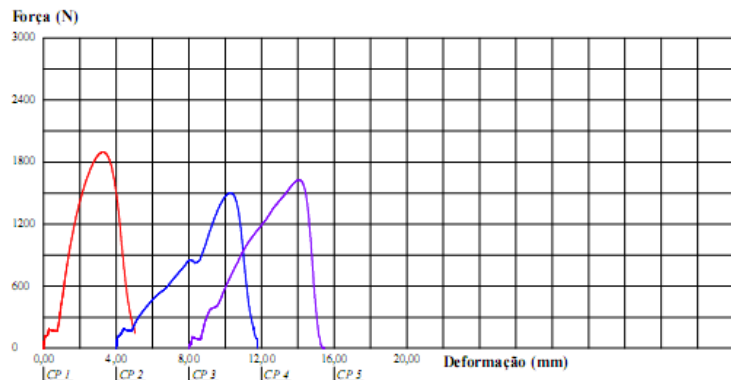


Figura 6-21. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 1
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D130000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 28/09/2017 Hora: 10:22:48 Trabalho n° **0710**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,5	0,3	2,2
CP 2	7,3	0,3	2,3
CP 3	3,8	0,2	1,6
Número CPs	3	3	3
Média	6,175	0,2574	2,022
Mediana	7,252	0,2741	2,153
Desv.Padrão	2,050	0,04848	0,3808
Coef.Var.(%)	33,20	18,83	18,83
Mínimo	3,811	0,2028	1,593
Máximo	7,463	0,2954	2,320

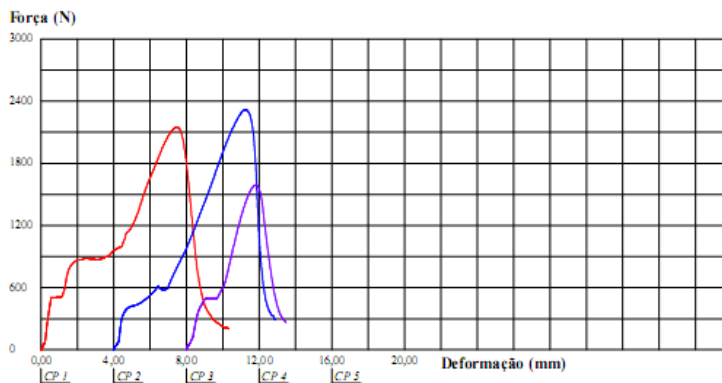


Figura 6-22. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 1
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D130000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 28/09/2017 Hora: 11:13:23 Trabalho n° **0711**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	6,1	0,3	2,0
CP 2	4,3	0,1	1,0
CP 3	8,1	0,2	1,7
Número CPs	3	3	3
Média	6,180	0,2020	1,587
Mediana	6,124	0,2205	1,732
Desv.Padrão	1,941	0,06446	0,5062
Coef.Var.(%)	31,40	31,91	31,91
Mínimo	4,268	0,1303	1,024
Máximo	8,148	0,2552	2,005

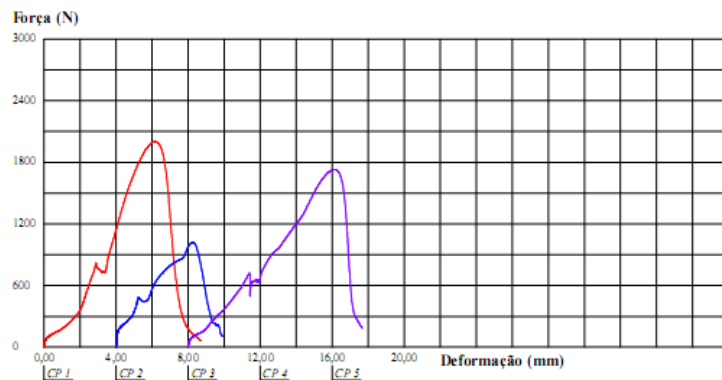


Figura 6-23. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 1
Fuente: elaboración propia

El resumen de resultados promedios se observa en la Tabla 6-5, en la cual se señala la tensión de corte máxima S_{max} y el desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 6-5. Resumen de resultados para la Situación 1
Fuente elaboración propia

Caso	S_{max} (MPa)	TD (mm)
1	0,187	7,6
2	0,227	4,5
3	0,235	5,9
4	0,214	5,2
5	0,257	6,2
6	0,202	6,2

6.2. Análisis de respuesta al corte para la Situación 2

Según lo ya realizado en la situación anterior, se establece un número de 3 probetas por Caso. Entonces, se moldean las 18 probetas de base a ser analizadas (probetas 31 a 48), las cuales se observan en la Figura 6-24, a la izquierda previo a la simulación del fresado en laboratorio y a la derecha luego del mismo.



Figura 6-24. Bases de las probetas antes y después del fresado, Situación 2
Fuente: elaboración propia

Se aplican los cálculos análogos a los de la Situación 1. En esta serie se establece un Coeficiente de Incremento (CI) del riego que implique $2/3$ del incremento de la superficie en la interfase, según se observa en la Tabla 6-6, para establecer el peso de emulsión a aplicarse en cada probeta.

Con estos valores se aplican en las probetas los riegos correspondientes, y se moldea la capa superior de las probetas dobles, las cuales pueden observarse en la Figura 6-25.

Tabla 6-6. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 2
Fuente: elaboración propia

Dotación óptima (l/m²):

0,25

PROBETAS	CI	DOTACION CORREGIDA (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)
31 a 33	1,242	0,31	491,4	3,9
34 a 36	1,319	0,33	521,9	4,1
37 a 39	1,408	0,35	556,9	4,4
40 a 42	1,507	0,38	596,0	4,7
43 a 45	1,561	0,39	617,4	4,8
46 a 48	1,630	0,41	644,8	5,1

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm ²):	78,5
AREA (m ²):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%

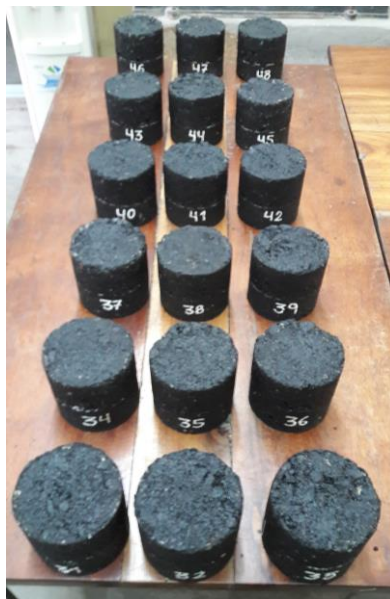


Figura 6-25. Probetas dobles para el análisis de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

Al efectuar los ensayos se observa en una mayor proporción de los Casos que la rotura se produce en parte en la mezcla asfáltica de la interfase y en parte en el riego de liga, a diferencia de la Situación 1, en la cual se observa que la misma se produjo mayoritariamente en el riego de liga. Esto evidencia una situación más favorable en tal sentido, pues puede interpretarse como una señal de que el riego no se estaría materializando con una dotación excesiva. En la Figura 6-26 se ven a la izquierda y de abajo hacia arriba probetas representativas de los Casos 1 a 3, y a la derecha y también de abajo hacia arriba las representativas de los Casos 4 a 6. Puede apreciarse aquí lo señalado en cuanto a la rotura de la interfase.

Las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para las series de probetas ensayadas pueden observarse de la Figura 6-27 a la Figura 6-32, correspondientes a los Casos 1 a 6, respectivamente. En las figuras puede verse como las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones, una distancia correspondiente a los 4,0 mm de deformación, de forma tal que puedan ser analizadas más fácilmente al evitarse su superposición.

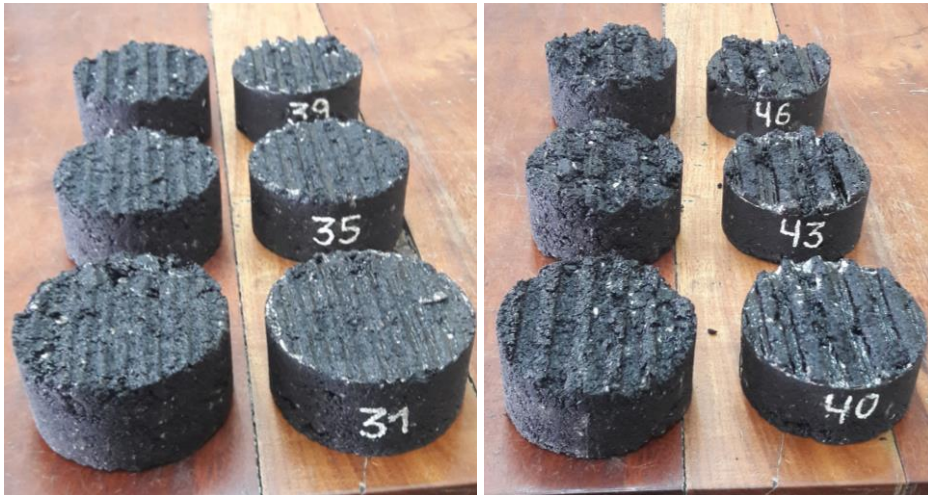


Figura 6-26. Interfase luego del ensayo en los Casos 1 a 6 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 06/12/2017 Hora: 10:17:42 Trabalho nº 0730
Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	6,8	0,2	1,7
CP 2	8,4	0,3	2,5
CP 3	11,4	0,3	2,0
Número CPs	3	3	3
Média	8,848	0,2633	2,068
Mediana	8,404	0,2547	2,001
Desv. Padrão	2,343	0,05087	0,3996
Coef. Var. (%)	26,48	19,32	19,32
Mínimo	6,759	0,2172	1,706
Máximo	11,38	0,3179	2,497

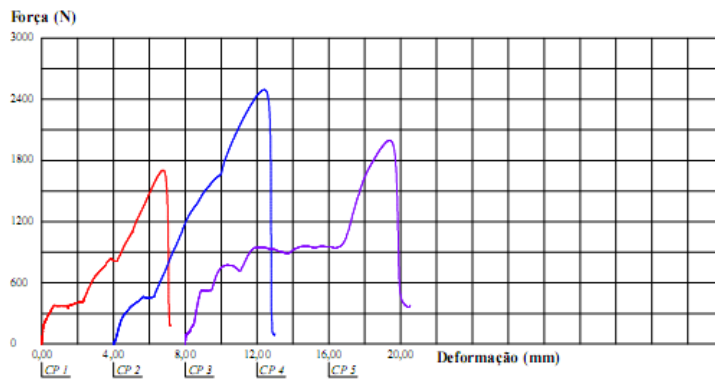


Figura 6-27. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 06/12/2017 Hora: 10:54:46 Trabalho n° **0731**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	8,2	0,4	2,9
CP 2	7,2	0,2	1,8
CP 3	6,2	0,3	2,0
Número CPs	3	3	3
Média	7,179	0,2856	2,243
Mediana	7,190	0,2504	1,967
Desv.Padrão	0,9948	0,07718	0,6062
Coef.Var.(%)	13,86	27,03	27,03
Mínimo	6,179	0,2322	1,824
Máximo	8,168	0,3741	2,938

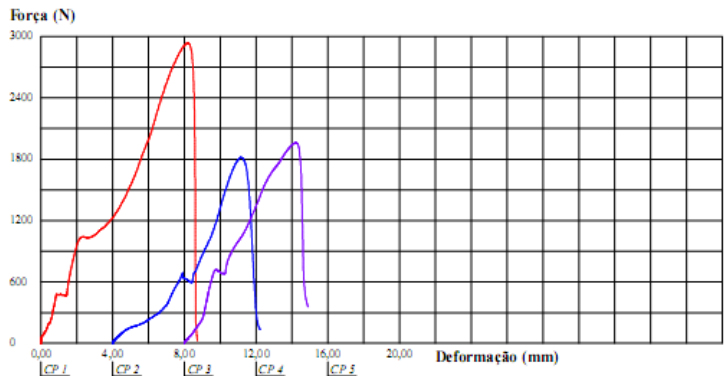


Figura 6-28. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 06/12/2017 Hora: 11:39:53 Trabalho n° **0732**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	6,2	0,3	2,1
CP 2	4,0	0,2	1,9
CP 3	4,4	0,3	2,1
Número CPs	3	3	3
Média	4,870	0,2560	2,011
Mediana	4,415	0,2615	2,053
Desv.Padrão	1,149	0,01190	0,09349
Coef.Var.(%)	23,59	4,650	4,650
Mínimo	4,018	0,2424	1,904
Máximo	6,177	0,2642	2,075

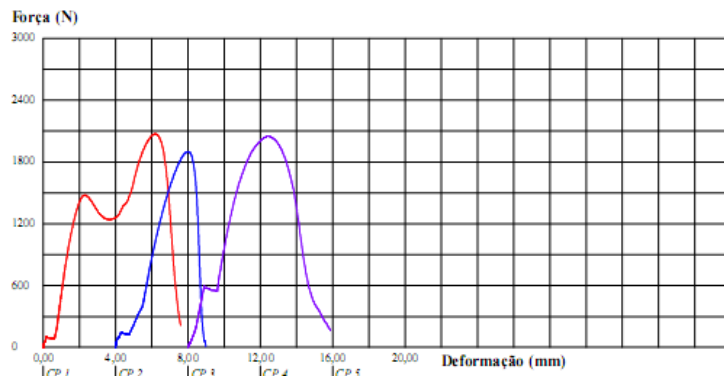


Figura 6-29. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 06/12/2017 Hora: 12:23:34 Trabalho n° **0733**
 Programa: **Tesc versão 3.05** Método de Ensaio: **Adherencia Frezado**
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: **Mezcla asfáltica (sup fresada)** Cliente: **Julian** Solicitação: **Adherencia entre capas**

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	3,6	0,3	2,1
CP 2	4,6	0,2	1,9
CP 3	4,1	0,3	2,2
Número CPs	3	3	3
Média	4,084	0,2632	2,067
Mediana	4,122	0,2699	2,120
Desv. Padrão	0,5038	0,01917	0,1506
Coef. Var. (%)	12,34	7,285	7,285
Mínimo	3,562	0,2415	1,897
Máximo	4,567	0,2780	2,184

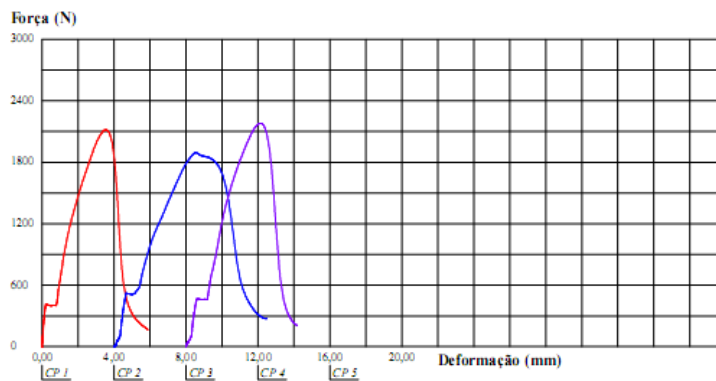


Figura 6-30. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 06/12/2017 Hora: 13:15:41 Trabalho n° **0734**
 Programa: **Tesc versão 3.05** Método de Ensaio: **Adherencia Frezado**
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: **Mezcla asfáltica (sup fresada)** Cliente: **Julian** Solicitação: **Adherencia entre capas**

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	6,7	0,3	2,0
CP 2	7,6	0,3	2,4
CP 3	7,6	0,2	1,9
Número CPs	3	3	3
Média	7,314	0,2700	2,121
Mediana	7,558	0,2540	1,995
Desv. Padrão	0,5004	0,03293	0,2586
Coef. Var. (%)	6,841	12,19	12,19
Mínimo	6,738	0,2482	1,949
Máximo	7,645	0,3079	2,418

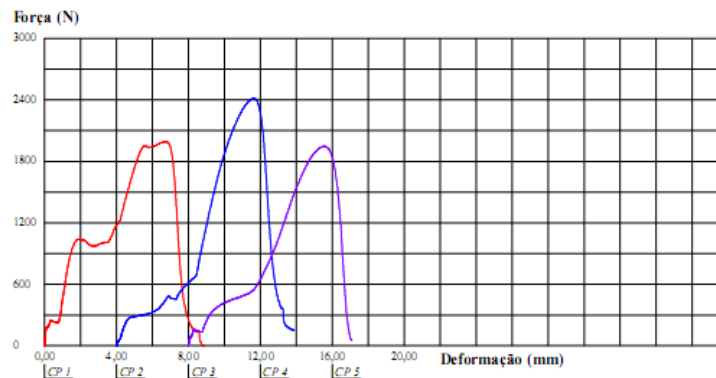


Figura 6-31. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 06/12/2017 Hora: 14:10:52 Trabalho nº 0735
 Programa: Tesc versão 3,05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: Adherencia entre capas

Copo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,2	0,3	2,4
CP 2	8,0	0,3	2,4
CP 3	6,0	0,4	2,8
Número CPs	3	3	3
Média	7,046	0,3249	2,552
Mediana	7,184	0,3109	2,442
Desv Padrão	1,008	0,02871	0,2255
CoefVar. (%)	14,30	8,836	8,836
Mínimo	5,976	0,3059	2,402
Máximo	7,977	0,3579	2,811

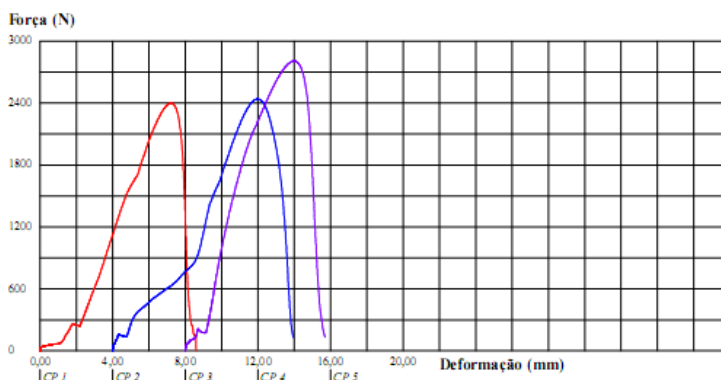


Figura 6-32. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 2
Fuente: elaboración propia

El resumen de resultados promedios se observa en la Tabla 6-7, donde se señala la tensión de corte máxima S_{max} y el desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 6-7. Resumen de resultados para la Situación 2
Fuente elaboración propia

Caso	S_{max} (MPa)	TD (mm)
1	0,263	8,8
2	0,286	7,2
3	0,256	4,9
4	0,263	4,1
5	0,270	7,3
6	0,325	7,0

6.3. Análisis de respuesta al corte para la Situación 3

Según lo ya realizado en la situación anterior, se establece un número de 3 probetas por Caso. Entonces, se moldean las 18 probetas de base a ser analizadas (probetas 49 a 66), las cuales se observan en la Figura 6-33, a la izquierda previo a la simulación del fresado en laboratorio y a la derecha luego del mismo.

Se aplican los cálculos análogos a los de la Situación 1. Se considera un Coeficiente de Incremento (CI) del riego que implique 1/3 del incremento de la superficie en la interfase, según se observa en la Tabla 6-8, para establecer el peso de emulsión a aplicarse en cada probeta.



Figura 6-33. Bases de las probetas antes y después del fresado, Situación 3
Fuente: elaboración propia

Tabla 6-8. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 3
Fuente: elaboración propia

Dotación óptima (l/m²):

PROBETAS	CI	DOTACION CORREGIDA (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)
49 a 51	1,121	0,28	443,5	3,5
52 a 54	1,160	0,29	458,7	3,6
55 a 57	1,204	0,30	476,2	3,7
58 a 60	1,253	0,31	495,8	3,9
61 a 63	1,280	0,32	506,5	4,0
64 a 66	1,315	0,33	520,2	4,1

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm ²):	78,5
AREA (m ²):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%

Con estos valores se aplican los riegos correspondientes y se moldea la capa superior de las probetas dobles, las cuales pueden observarse en la Figura 6-34.

Al efectuar los ensayos se ve en la mayoría de los mismos que la rotura se produce en parte en la mezcla asfáltica de la interfase y en parte en el riego de liga. En la Figura 6-35 se observan a la izquierda y de abajo hacia arriba probetas representativas de los Casos 1 a 3, y a la derecha y también de abajo hacia arriba las representativas de los Casos 4 a 6. Puede advertirse aquí lo señalado en cuanto a la rotura de la interfase.



Figura 6-34. Probetas dobles para el análisis de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

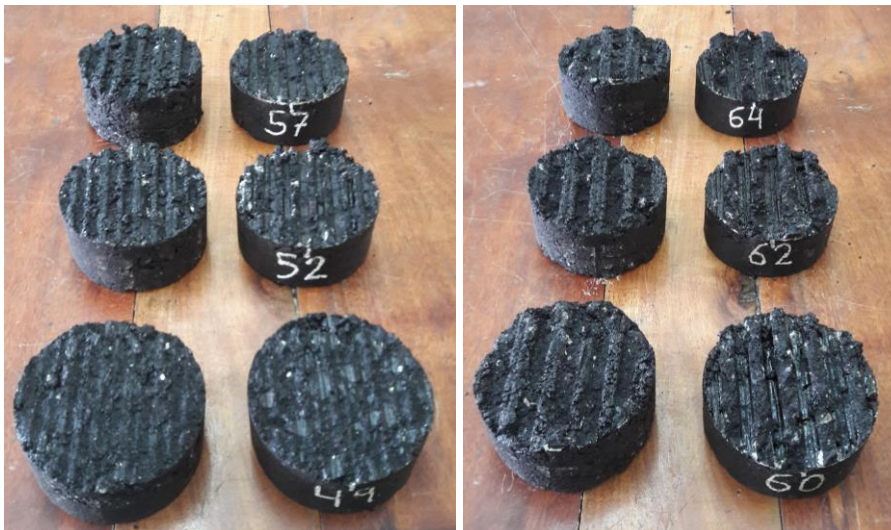


Figura 6-35. Interfase luego del ensayo en los Casos 1 a 6 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

Las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para las series de probetas ensayadas pueden apreciarse de la Figura 6-36 a la Figura 6-41, correspondientes a los Casos 1 a 6, respectivamente. En las figuras puede verse como las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones, una distancia correspondiente a los 4,0 mm de deformación, de forma tal que puedan ser analizadas más fácilmente al evitarse su superposición.

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic Inválido Célula: Inválido Extensômetro: Inválido Data: 27/12/2017 Hora: 10:32:21 Trabalho nº **0738**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Sollicitación: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,9	0,4	2,9
CP 2	8,2	0,3	2,5
CP 3	6,2	0,3	2,5
Número CPs	3	3	3
Média	7,460	0,3337	2,621
Mediana	7,935	0,3185	2,501
Desv.Padrão	1,074	0,02973	0,2335
Coef.Var.(%)	14,40	8,910	8,910
Mínimo	6,230	0,3146	2,471
Máximo	8,215	0,3679	2,890

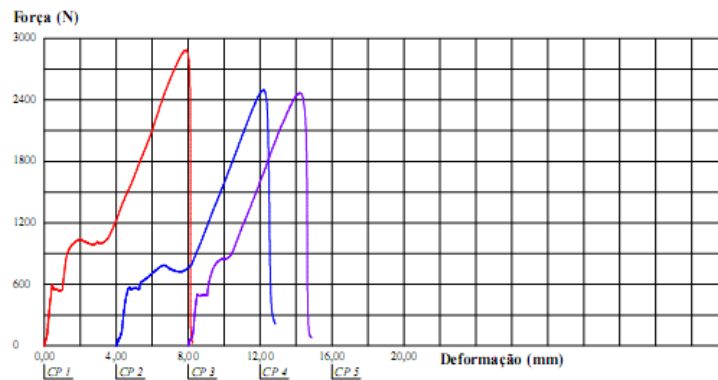


Figura 6-36. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 11:16:11 Trabalho nº **0739**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Sollicitación: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	5,3	0,3	2,3
CP 2	4,6	0,3	2,5
CP 3	4,4	0,3	2,6
Número CPs	3	3	3
Média	4,745	0,3130	2,458
Mediana	4,571	0,3187	2,503
Desv.Padrão	0,4599	0,01694	0,1330
Coef.Var.(%)	9,694	5,411	5,411
Mínimo	4,396	0,2939	2,308
Máximo	5,266	0,3263	2,563

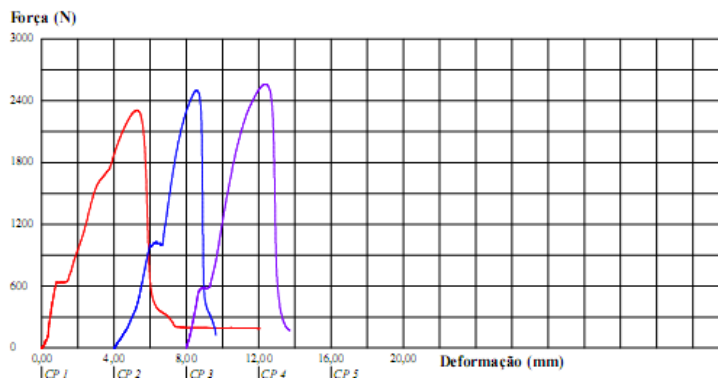


Figura 6-37. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 12:06:26 Trabalho n° **0740**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,9	0,4	3,1
CP 2	8,0	0,3	2,5
CP 3	7,1	0,4	2,8
Número CPs	3	3	3
Média	7,663	0,3552	2,790
Mediana	7,881	0,3514	2,760
Desv.Padrão	0,4756	0,04046	0,3177
Coef.Var.(%)	6,206	11,39	11,39
Mínimo	7,118	0,3168	2,488
Máximo	7,991	0,3974	3,121

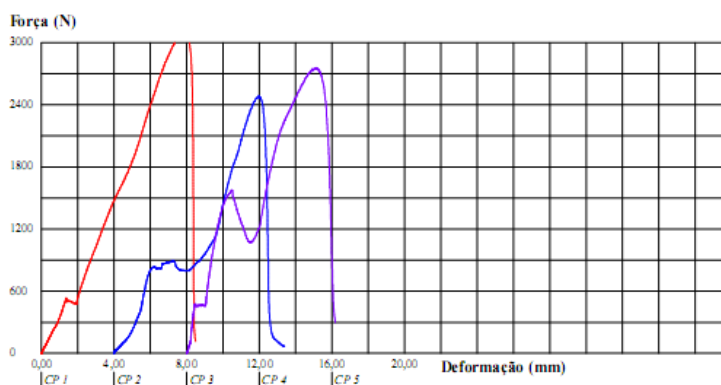


Figura 6-38. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 12:44:22 Trabalho n° **0741**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,2	0,3	2,6
CP 2	6,5	0,3	2,3
CP 3	8,4	0,3	2,4
Número CPs	3	3	3
Média	7,364	0,3077	2,417
Mediana	7,182	0,3056	2,400
Desv.Padrão	0,9952	0,01776	0,1395
Coef.Var.(%)	13,51	5,770	5,770
Mínimo	6,473	0,2911	2,287
Máximo	8,438	0,3265	2,564

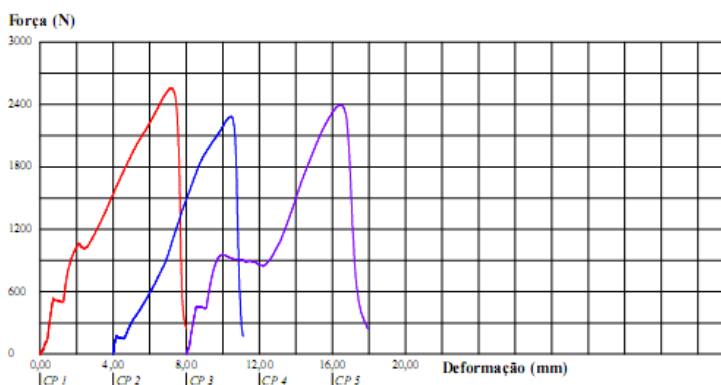


Figura 6-39. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D1.30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 13:29:15 Trabalho n° **0742**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	8,9	0,3	2,4
CP 2	9,5	0,4	2,8
CP 3	7,3	0,3	2,5
Número CPs	3	3	3
Média	8,569	0,3289	2,583
Mediana	8,925	0,3196	2,510
Desv.Padrão	1,104	0,03038	0,2386
Coef.Var.(%)	12,88	9,237	9,237
Mínimo	7,331	0,3042	2,389
Máximo	9,451	0,3628	2,849

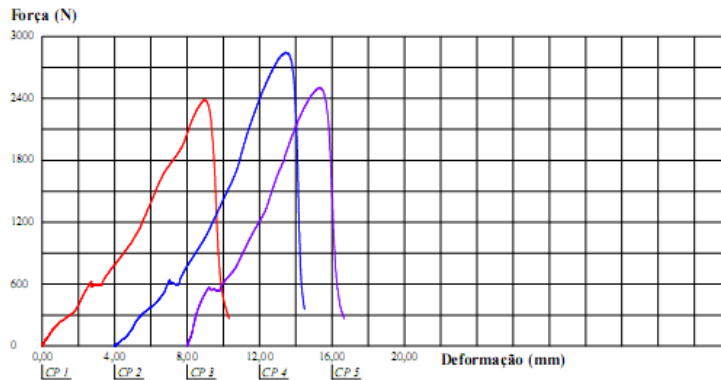


Figura 6-40. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D1.30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 27/12/2017 Hora: 14:09:20 Trabalho n° **0743**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	8,4	0,4	2,9
CP 2	7,0	0,3	2,6
CP 3	7,9	0,3	2,7
Número CPs	3	3	3
Média	7,764	0,3482	2,735
Mediana	7,907	0,3442	2,703
Desv.Padrão	0,7337	0,01480	0,1162
Coef.Var.(%)	9,451	4,250	4,250
Mínimo	6,969	0,3359	2,638
Máximo	8,415	0,3646	2,864

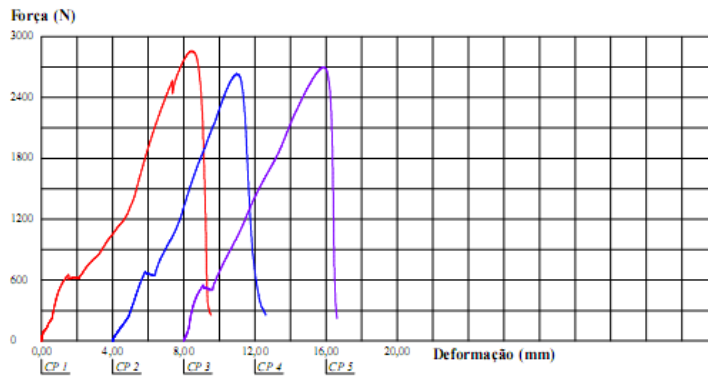


Figura 6-41. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 3
Fuente: elaboración propia

El resumen de resultados promedios se observa en la Tabla 6-9, donde se señala la tensión de corte máxima S_{max} y el desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 6-9. Resumen de resultados para la Situación 3
Fuente elaboración propia

Caso	S_{max} (MPa)	TD (mm)
1	0,334	7,5
2	0,313	4,7
3	0,355	7,7
4	0,308	7,4
5	0,329	8,6
6	0,348	7,8

6.4. Análisis de respuesta al corte para la Situación 4

Según lo ya realizado en la situación anterior, se establece un número de 3 probetas por Caso. Entonces, se moldean las 18 probetas de base a ser analizadas (probetas 67 a 84), las cuales se observan en la Figura 6-42, a la izquierda previo a la simulación del fresado en laboratorio y a la derecha luego del mismo.



Figura 6-42. Bases de las probetas antes y después del fresado, Situación 4
Fuente: elaboración propia

Se aplican los cálculos análogos a los de la Situación 1. Se considera un Coeficiente de Incremento (CI) del riego de 1, según se observa en la Tabla 6-10, para establecer el peso de emulsión a aplicarse en cada probeta.

Con estos valores se aplican en las probetas los riegos correspondientes, y se moldea la capa superior de las probetas dobles, las cuales pueden verse en la Figura 6-43.

Al efectuar los ensayos se observa como en los Casos 5 y 6 que la rotura se produce en sectores menores en la mezcla asfáltica de la interfase, mientras que en los Casos 1 a 4 se produce mayoritariamente en el riego de liga. En la Figura 6-44 se aprecian a la izquierda y de abajo hacia arriba probetas representativas de los Casos 1 a 3, y a la derecha y también de abajo hacia arriba las representativas de los Casos 4 a 6. Puede verse aquí lo señalado en cuanto a la rotura de la interfase.

Tabla 6-10. Cantidad de emulsión a ser aplicada por probeta en la Situación 4
Fuente: elaboración propia

PROBETAS	DOTACION (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)
67 a 84	0,25	395,6	3,1

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm ²):	78,5
AREA (m ²):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%



Figura 6-43. Probetas dobles para el análisis de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

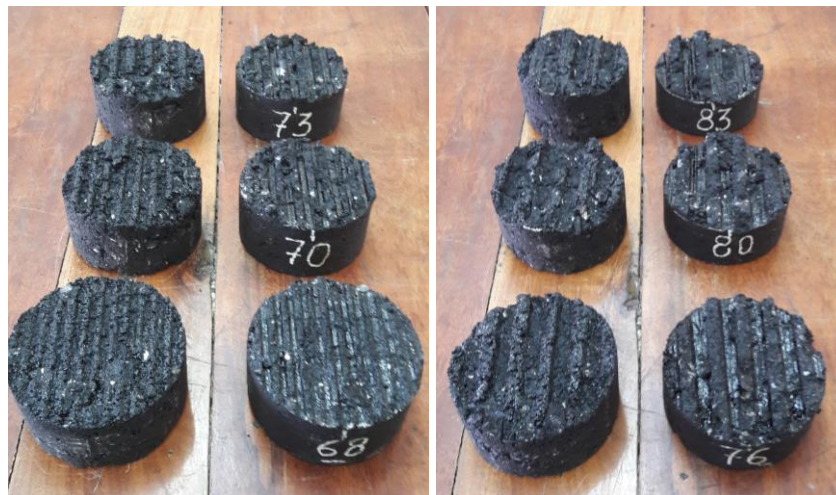


Figura 6-44. Interfase luego del ensayo en los Casos 1 a 6 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

Las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para las series de probetas ensayadas pueden observarse de la Figura 6-45 a la Figura 6-50, correspondientes a los Casos 1 a 6, respectivamente. En las figuras puede verse como las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones, una distancia correspondiente a los 4,0 mm de deformación, de forma tal que puedan ser analizadas más fácilmente al evitarse su superposición.

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 15/02/2018 Hora: 15:00:14 Trabalho n° **0745**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	2,2	0,1	0,9
CP 2	4,1	0,2	1,5
CP 3	2,8	0,1	1,2
Número CPs	3	3	3
Média	3,041	0,1515	1,190
Mediana	2,821	0,1488	1,168
Desv.Padrão	0,9488	0,03305	0,2596
Coef.Var.(%)	31,20	21,81	21,81
Mínimo	2,221	0,1199	0,9418
Máximo	4,080	0,1859	1,460

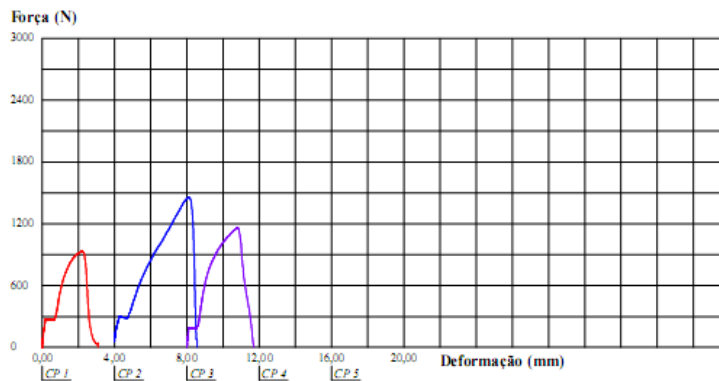


Figura 6-45. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 1 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 15/02/2018 Hora: 15:25:09 Trabalho n° **0746**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitud: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	4,9	0,2	1,6
CP 2	4,4	0,2	1,7
CP 3	4,7	0,2	1,7
Número CPs	3	3	3
Média	4,662	0,2145	1,685
Mediana	4,671	0,2149	1,688
Desv.Padrão	0,2702	0,006357	0,04993
Coef.Var.(%)	5,797	2,964	2,964
Mínimo	4,387	0,2080	1,633
Máximo	4,927	0,2207	1,733

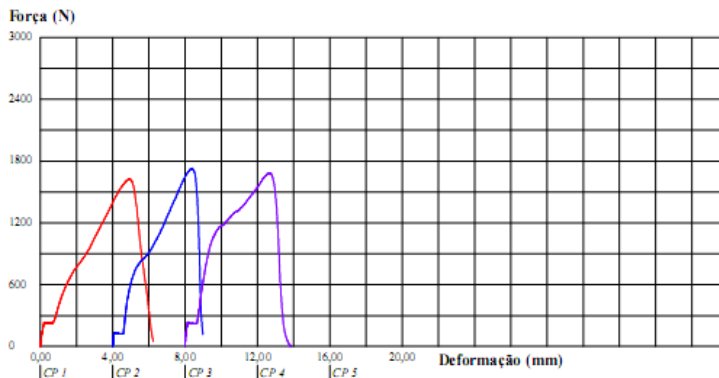


Figura 6-46. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 2 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 15/02/2018 Hora: 16:04:52 Trabalho n° **0747**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	6,1	0,3	2,2
CP 2	4,4	0,2	1,6
CP 3	7,2	0,3	2,2
Número CPs	3	3	3
Média	5,881	0,2563	2,013
Mediana	6,091	0,2787	2,189
Desv.Padrão	1,407	0,04404	0,3459
Coef.Var.(%)	23,93	17,18	17,18
Mínimo	4,381	0,2055	1,614
Máximo	7,172	0,2846	2,235

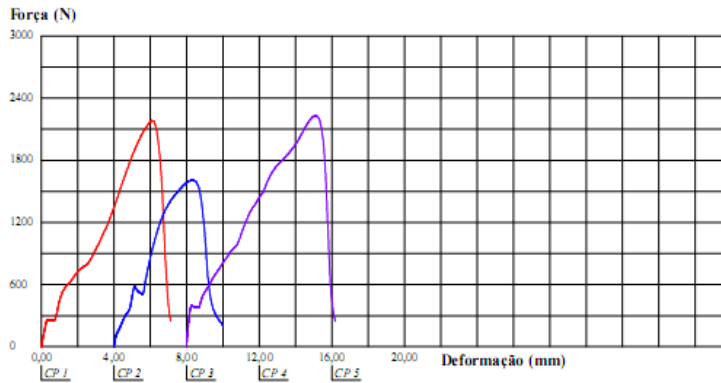


Figura 6-47. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 3 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 15/02/2018 Hora: 16:42:12 Trabalho n° **0748**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	8,8	0,3	2,0
CP 2	9,2	0,3	2,1
CP 3	6,7	0,2	1,7
Número CPs	3	3	3
Média	8,214	0,2472	1,941
Mediana	8,811	0,2558	2,009
Desv.Padrão	1,360	0,02324	0,1825
Coef.Var.(%)	16,55	9,401	9,401
Mínimo	6,658	0,2208	1,734
Máximo	9,173	0,2648	2,080

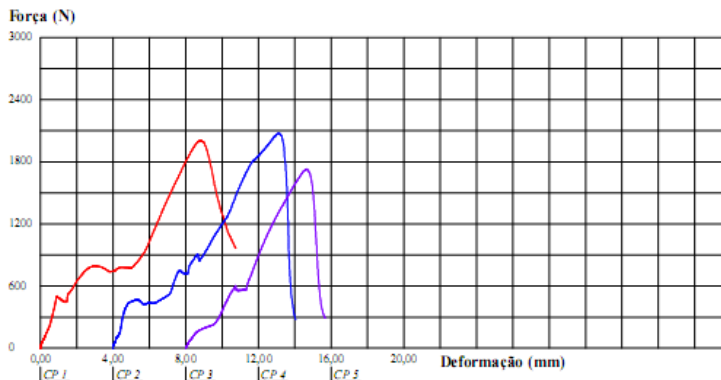


Figura 6-48. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 4 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D1.30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 15/02/2018 Hora: 17:21:56 Trabalho n° **0749**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Sollicitación: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,3	0,4	2,8
CP 2	7,1	0,2	1,9
CP 3	7,2	0,2	1,6
Número CPs	3	3	3
Média	7,212	0,2688	2,111
Mediana	7,193	0,2388	1,876
Desv Padrão	0,08712	0,08295	0,6515
Coef Var. (%)	1,208	30,86	30,86
Mínimo	7,136	0,2049	1,610
Máximo	7,307	0,3625	2,847

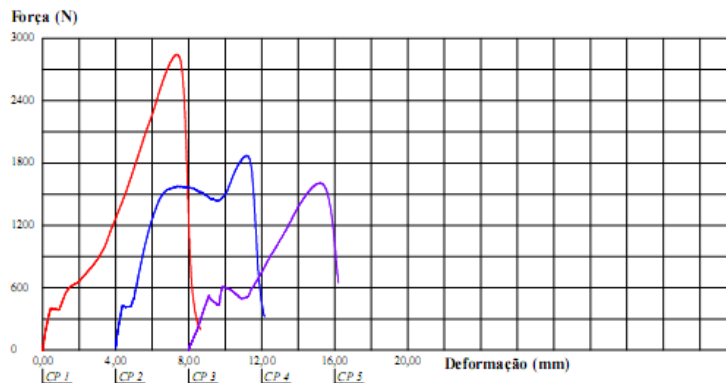


Figura 6-49. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 5 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic D1.30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 15/02/2018 Hora: 18:03:41 Trabalho n° **0750**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Sollicitación: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	7,7	0,3	2,4
CP 2	7,3	0,3	2,7
CP 3	7,0	0,3	2,0
Número CPs	3	3	3
Média	7,350	0,3001	2,357
Mediana	7,291	0,3014	2,367
Desv Padrão	0,3657	0,04664	0,3663
Coef Var. (%)	4,975	15,54	15,54
Mínimo	7,018	0,2528	1,985
Máximo	7,742	0,3461	2,718

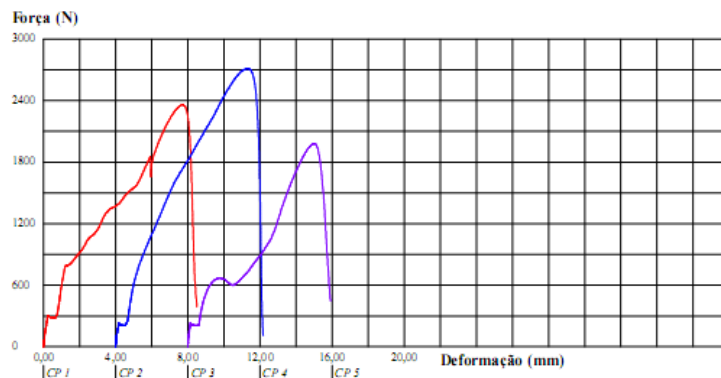


Figura 6-50. Resultados de los ensayos de corte en el Caso 6 de la Situación 4
Fuente: elaboración propia

El resumen de resultados promedios se observa en la Tabla 6-11, donde se señala la tensión de corte máxima S_{max} y el desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 6-11. Resumen de resultados para la Situación 4
Fuente elaboración propia

Caso	S_{max} (MPa)	TD (mm)
1	0,151	3,0
2	0,215	4,7
3	0,256	5,9
4	0,247	8,2
5	0,269	7,2
6	0,300	7,3

6.5. Resumen de resultados y análisis de la situación óptima para cada Caso

Los resultados obtenidos permiten desarrollar la Tabla 6-12 y la Tabla 6-13, donde se vuelcan los valores promedio de S_{max} y TD , respectivamente, para los correspondientes valores de CI , en cada Caso y cada Situación.

Tabla 6-12. Resumen de resultados de S_{max} para ensayos sobre superficie fresada
Fuente: elaboración propia

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	CI	S_{max} (MPa)	CI	S_{max} (MPa)	CI	S_{max} (MPa)	CI	S_{max} (MPa)	CI	S_{max} (MPa)	CI	S_{max} (MPa)
Situación 1	1,363	0,187	1,479	0,227	1,612	0,235	1,760	0,214	1,841	0,257	1,945	0,202
Situación 2	1,242	0,263	1,319	0,286	1,408	0,256	1,507	0,263	1,561	0,270	1,630	0,325
Situación 3	1,121	0,334	1,160	0,313	1,204	0,355	1,253	0,308	1,280	0,329	1,315	0,348
Situación 4	1,000	0,151	1,000	0,215	1,000	0,256	1,000	0,247	1,000	0,269	1,000	0,300

Tabla 6-13. Resumen de resultados de TD para ensayos sobre superficie fresada
Fuente: elaboración propia

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	CI	TD (mm)	CI	TD (mm)	CI	TD (mm)	CI	TD (mm)	CI	TD (mm)	CI	TD (mm)
Situación 1	1,363	7,6	1,479	4,5	1,612	5,9	1,760	5,2	1,841	6,2	1,945	6,2
Situación 2	1,242	8,8	1,319	7,2	1,408	4,9	1,507	4,1	1,561	7,3	1,630	7,0
Situación 3	1,121	7,5	1,160	4,7	1,204	7,7	1,253	7,4	1,280	8,6	1,315	7,8
Situación 4	1,000	3,0	1,000	4,7	1,000	5,9	1,000	8,2	1,000	7,2	1,000	7,3

Cabe destacar que los resultados de S_{max} volcados en la Tabla 6-12 resultan apenas superiores a los obtenidos para el caso de la interfase lisa en su dotación óptima. Este aspecto parece implicar que en ambos casos la situación óptima refleja la rotura del sistema conformado por ambas capas, al cual la existencia del fresado y la mayor superficie de interfase implicada sólo aportarían un componente menor de resistencia adicional.

Por medio de los resultados de la Tabla 6-12 pueden generarse los gráficos de la Figura 6-51 a la Figura 6-53, en los cuales se observa que en todos los casos los máximos resultados de S_{max} se obtienen para los ensayos de la Situación 3.

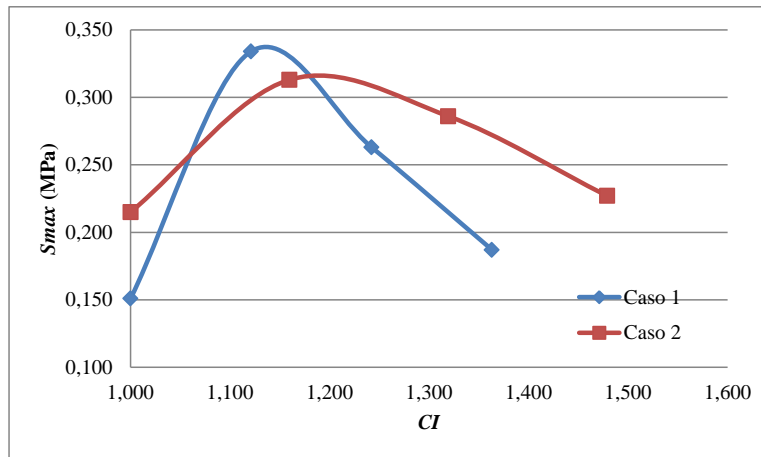


Figura 6-51. Gráfica S_{max} versus CI en Caso 1 y Caso 2
Fuente: elaboración propia

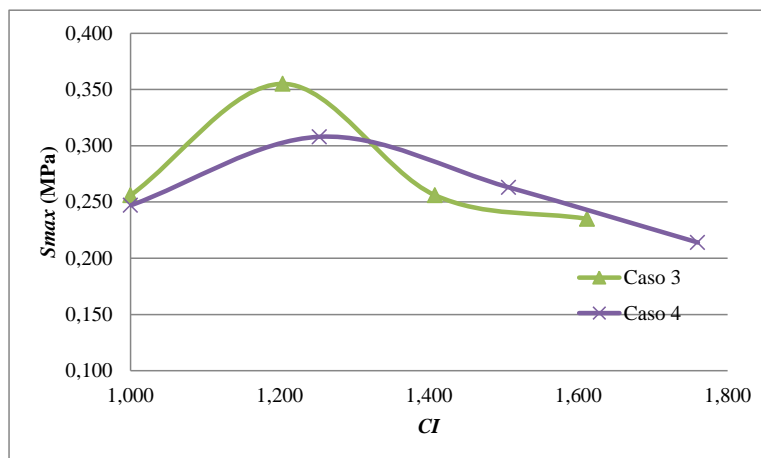


Figura 6-52. Gráfica S_{max} versus CI en Caso 3 y Caso 4
Fuente: elaboración propia

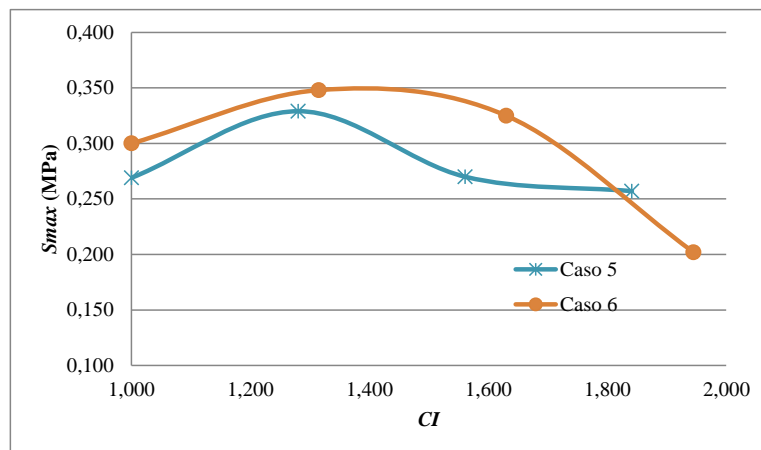


Figura 6-53. Gráfica S_{max} versus CI en Caso 5 y Caso 6
Fuente: elaboración propia

Por su parte los resultados de la Tabla 6-13 permiten generar los gráficos de la Figura 6-54 a la Figura 6-56, en los cuales se observan tendencias no tan marcadas en los resultados de TD ; no obstante cabe señalar que en la mayoría de los casos el máximo se obtiene para las Situaciones intermedias, observándose a la Situación 2 y 3 como las mayoritarias generadoras de los mismos.

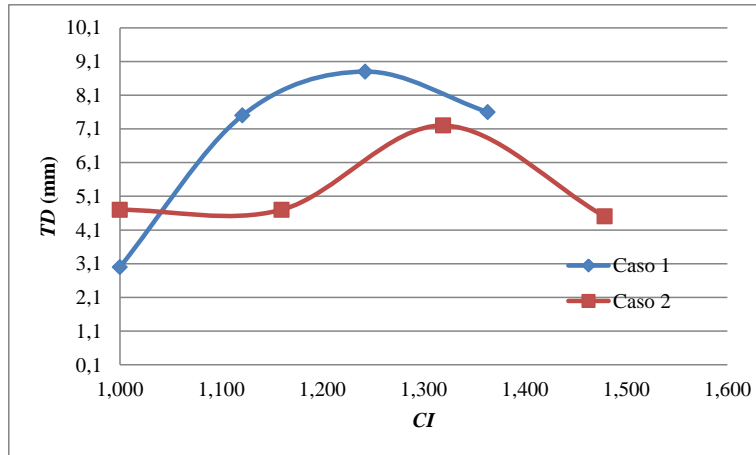


Figura 6-54. Gráfica TD versus CI en Caso 1 y Caso 2
Fuente: elaboración propia

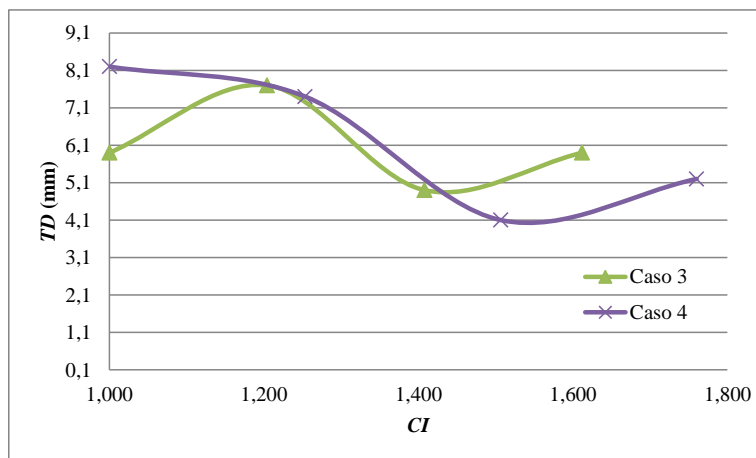


Figura 6-55. Gráfica TD versus CI en Caso 3 y Caso 4
Fuente: elaboración propia

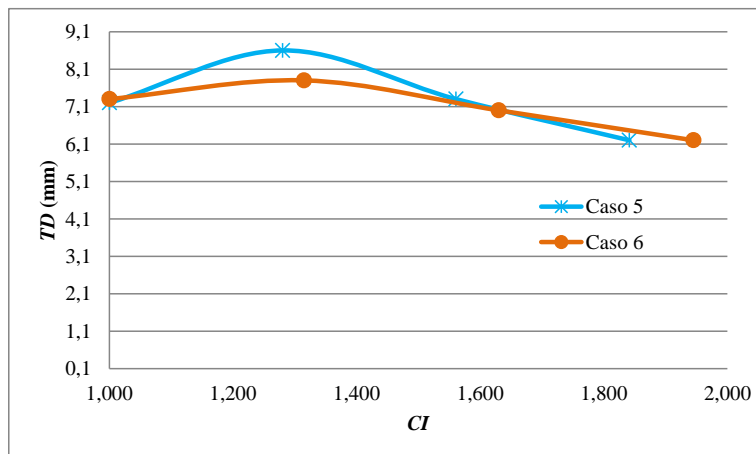


Figura 6-56. Gráfica TD versus CI en Caso 5 y Caso 6
Fuente: elaboración propia

Es importante señalar en este punto que en los ensayos realizados, tanto para el caso de interfase lisa como aquella con fresado, se han obtenido curvas de tensión versus deformación que presentan de manera genérica la forma que se esquematiza en la Figura 6-57.

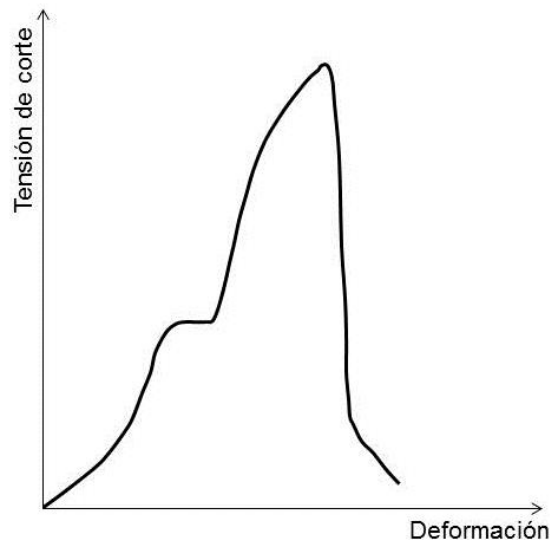


Figura 6-57. Curva característica de tensión versus deformación obtenida
Fuente: elaboración propia

La causa más probable de esta forma de la curva reside en que, al incrementarse la tensión ejercida, se pasa de un primer comportamiento en el cual se registra la resistencia del ligante asfáltico del riego que recubre al fresado, de carácter visco-cohesivo, a un comportamiento al que se debe adicionar la fricción por contacto entre los surcos del fresado, pasando por una zona de transición entre ambos comportamientos. Más allá de lo manifestado, a los fines de la presente tesis basta con observar que esta zona de perturbación se encuentra en todos los casos lo suficientemente alejada del S_{max} y TD , como para considerar que pueda tener alguna incidencia en la obtención de ambos.

6.6. Metodología de análisis resultante de los estudios

Puesto que en todos los Casos la Situación 3 implica los CI óptimos, se puede establecer el Coeficiente de Incremento de Riego (CIR), que permitiría finalmente, mediante la Ecuación 6-2, establecer la Dotación de Riego Incrementada (DRI), a partir de una Dotación de Riego (DR).

$$DRI = CIR \cdot DR \quad (6-2)$$

Lo señalado oportunamente, en cuanto a la diferencia positiva de volumen de arena implicada al introducir el perfil de fresado simplificado adoptado respecto al que posiblemente involucre el perfil real, es posible que también explique en parte el por qué existiría una sobreestimación del CIA respecto del CIR . Más allá de eso, los análisis realizados permiten la obtención de CIR que implican una respuesta mecánica óptima; por lo que, a los efectos de su aplicación, no resulta indispensable establecer qué proporción de la diferencia entre el CIA y el CIR se debe a lo señalado y qué proporción a la acumulación de riego en exceso en los surcos del fresado.

Para arribar a los DRI en función de los Diámetros de Parche de Arena (DPA), sólo resta correlacionar a los valores obtenidos para cada caso, volcados en la Tabla 4-8, con los CI óptimos establecidos (asumidos ahora como los DRI). En la Tabla 6-14 se observan los valores de ambas variables a ser correlacionadas y en la Figura 6-58 la gráfica con la correlación obtenida.

Tabla 6-14. Valores de *CIR* versus *DPA*
Fuente: elaboración propia

Caso	<i>CIR</i>	<i>DPA</i> (cm)
1	1,121	24,2
2	1,160	19,8
3	1,204	16,1
4	1,253	13,0
5	1,280	11,6
6	1,315	10,2

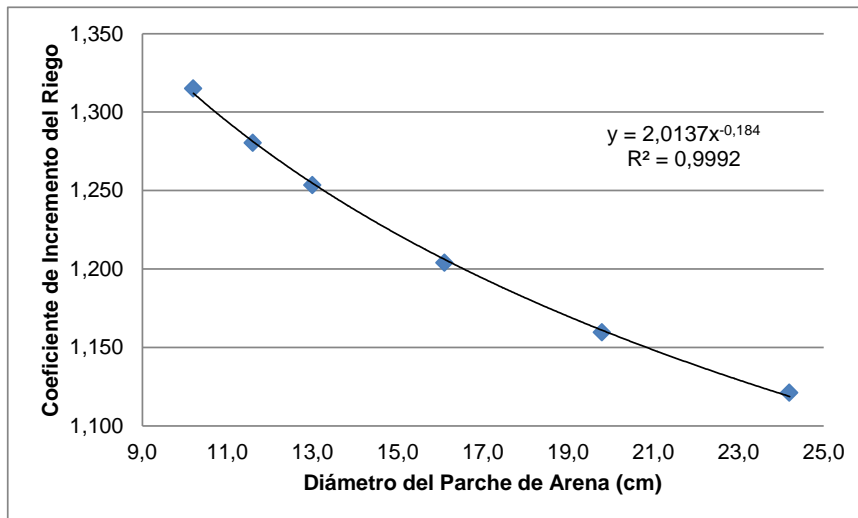


Figura 6-58. Gráfica de *CIR* versus *DPA* y su función de correlación
Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Figura 6-58, se puede ajustar por regresión a la nube de puntos una función del tipo potencial, la cual permite obtener un coeficiente de determinación R^2 de 0,99, acorde al umbral empírico generalmente establecido para estudios de esta índole de 0,90 (Bello, 2016).

Finalmente, la fórmula que permite establecer el *CIR* en función del *DPA*, resultante para un volumen de arena de 40 cm^3 , es la que se observa en la Ecuación 6-3.

$$CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184} \quad (6-3)$$

6.7. Forma de empleo en obra de la metodología de análisis resultante

Una idea de partida con que se cuenta es que en una obra, es posible que se registren diversos tramos homogéneos de superficie fresada a ser reforzada, ya sea porque se realiza esta tarea con diferentes equipos, con un mismo equipo sometido a mantenimiento (cambio de puntas de fresado, modificación del tambor de fresado, etc.), por la variabilidad misma en el empleo de dicho equipo y de su operador, etc.

La metodología de análisis resultante, a partir de esta consideración, puede emplearse allí, al menos de tres formas diferentes.

La primera forma se asocia directamente con los pasos llevados adelante en las experiencias realizadas. Es decir, se parte de conocer el material a ser hallado en obra y el que será aplicado como refuerzo. Esto permite generar en el laboratorio pastones de prueba representativos de dichos materiales. A partir de éstos, se determina con

probetas dobles, o mediante alguna otra vía válida, la dotación óptima a utilizarse en el caso de una interfase entre superficies lisas. Luego, en obra, se procede al ajuste de dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado. Esto se aplica en cada tipología de tramo homogéneo registrada.

La segunda forma se basa en que en cada tramo representativo de los materiales de la obra se extraigan testigos de la carpeta de rodamiento existente. Se confeccionan con éstos y con el material a ser empleado en el refuerzo las probetas dobles necesarias. Con ellas se determina el contenido óptimo de riego de liga para la interfase entre superficies lisas. Acto seguido, se efectúa el ajuste de dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra, tal cual en la primera opción.

La tercera forma puede resultar un poco más compleja y atractiva de aplicar. Se basa en instrumentar “tramos de prueba” del fresado. Así, en cada uno de éstos, representativo de los materiales de la obra y del fresado, se extraen testigos de la carpeta de rodamiento existente. Simultáneamente, se realizan en los mismos las mediciones correspondientes con la metodología análoga al Parche de Arena desarrollada. Luego, se confeccionan, con los testigos y con el material a ser empleado en el refuerzo, las probetas dobles necesarias y se determina el contenido óptimo de riego de liga para la interfase con esa textura de fresado. Esto permite entonces aplicar sobre esa dotación los modelos desarrollados en forma inversa, de manera tal de establecer virtualmente cuál sería la dotación óptima de riego de liga si el ensayo se hubiera realizado en el caso de la interfase lisa. Finalmente, se ajusta dicha dotación en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado, en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra, tal cual en la primera opción.

Estas formas de empleo no serían en todos los casos alternativas factibles entre las cuales optar, pues es posible que en ciertas aplicaciones los condicionantes existentes lleven a la posibilidad de uso de sólo una o dos de estas alternativas. El criterio ingenieril debe utilizarse para decidir en tal sentido. Como un ejemplo, puede mencionarse un caso en el cual el uso de la primera alternativa de aplicación sería el más indicado. Se trata de obras nuevas, en las cuales, por razones de terminación superficial o corrección de espesores, se deba fresar en sectores parte del espesor de una base asfáltica, previo a la colocación de la capa de rodamiento asfáltica. En dicha situación, la determinación de la dotación óptima de riego de liga, se obtendría posiblemente a través de ensayos de probetas con interfase lisa durante los estudios previos a la realización de la obra. Así, se aplicarían las correcciones en la dotación del riego cuando deban resolverse los sectores mencionados. En cambio, un ejemplo en el cual no sería conveniente emplear la primera alternativa, sería el caso de obras de refuerzo de pavimentos muy envejecidos, en las cuales el moldeo de una mezcla en laboratorio para la confección de las bases de las probetas podría no resultar representativo.

6.8. Análisis de respuesta al corte a fatiga

Para concluir esta instancia de análisis, se plantea estudiar si existen indicios de que la dotación de riego de liga óptima, establecida mediante la solicitud de la interfase en forma estática, refleja la situación óptima registrada a fatiga por la solicitud dinámica del tránsito. En tal sentido, se decide tomar una situación de muestra, para lo cual se selecciona el Caso 4. Con un ejemplo de dicho caso se analiza la respuesta a fatiga en las cuatro Situaciones que fueron descritas en el punto 6 (Situación 1 a

Situación 4). De ese modo, se observa si el contenido óptimo estimado por esta vía se condice con el establecido mediante los ensayos de corte ante carga estática.

Para conducir los análisis a fatiga, se toma de la recopilación bibliográfica aquella sistemática de ensayo que se presume refleja de mejor manera las condiciones de campo, y resulta de aplicación probable a los propósitos de esta tesis. El ensayo en cuestión es el propuesto por Romanoschi (1999), denominado *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* (ensayo de fatiga al corte de interfaces entre capas asfálticas), cuyo esquema puede observarse en la Figura 6-59. Se ve como, dada la inclinación adoptada, la carga cíclica vertical P se descompone en una carga normal N y en una carga de corte tangencial a la interfase en análisis T . Como en este caso la inclinación es cercana a los 25° , se obtiene una relación 2:1 entre la fuerza N y la fuerza T .

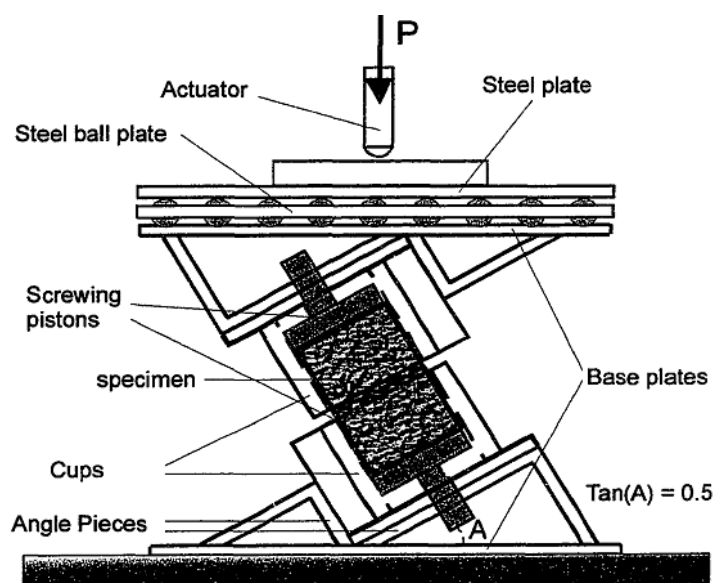


Figura 6-59. Esquema del *Shear Fatigue Test*
Fuente: Romanoschi, 1999

Para efectuar este ensayo en las instalaciones del LEMaC, se cuenta con el equipo destinado al ensayo de Módulo Dinámico de acuerdo a la Norma UNE-EN12697-26, el cual puede ser empleado mediante algunas modificaciones menores a tales efectos. Dicho equipo se configura para otorgar una dada cantidad de ciclos de carga por segundo, de acuerdo a la gráfica de sollicitación que se observa en la Figura 6-60.

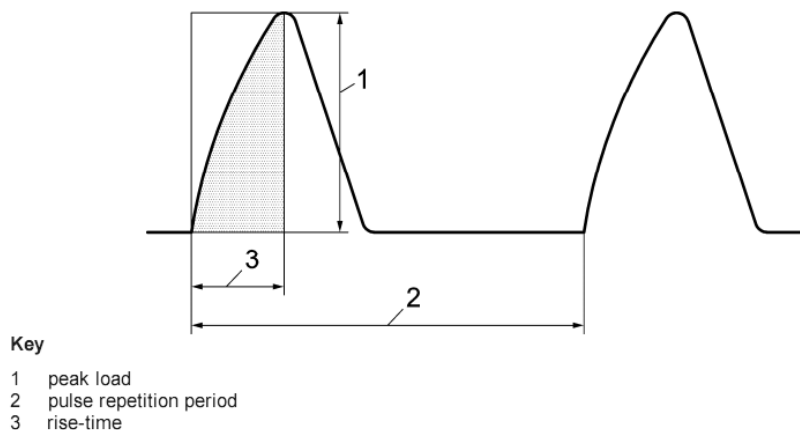


Figura 6-60. Ciclo de carga para el ensayo a fatiga
Fuente: BSI, 2012

Las probetas dobles cúbicas a ser ensayadas tienen 10 cm por lado, lo cual se considera una dimensión mínima representativa del rango de fresado. Para establecer la magnitud del pico de carga (*peak load*) se podría pensar, en principio, utilizar aquella carga que permita alcanzar la S_{max} mínima requerida por el Pliego de DNV, Esto permitiría contar con un valor comparativo, que tiene ya un grado de especificación y aceptación en el medio. Esta tensión guardaría también relación con el rango de la distribución de esfuerzos de corte en interfases de variadas estructuras de pavimentos, propuestas y analizadas mediante la técnica de los elementos finitos por Giovanon y Buono (2008), las que oscilan entre 0,3 MPa y 0,8 MPa. Pero dado que la máxima carga cíclica que puede otorgar el equipo con que cuenta el LEMaC es de 500 kg, esto no resulta factible. Por lo expresado, se decide obtener al menos una tensión de corte en la interfase de la mitad de la establecida como la mínima requerida por DNV (es decir 0,35 MPa, en el caso de un material ideal indeformable que transmitiría a la interfase de forma uniforme toda la carga aplicada). Por ello, se instrumenta una inclinación de ensayo de la probeta de 45° (obteniéndose una situación más desfavorable que en el ensayo de *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* por utilizarse una relación de 1:1 entre N y T) y se aplica esa carga máxima. Por otra parte, el periodo de repetición de la carga (*pulse repetition period*) se fija en una determinada cantidad de segundos, imponiendo el periodo de carga (*rise-time*) de 124±4 msec según lo recomendado en la norma.

El esquema del sistema de ensayo adaptado en el LEMaC, a los efectos del desarrollo de esta tesis, puede observarse en la Figura 6-61, con los surcos del fresado dispuestos en dirección al plano de deslizamiento a generarse durante el ensayo.

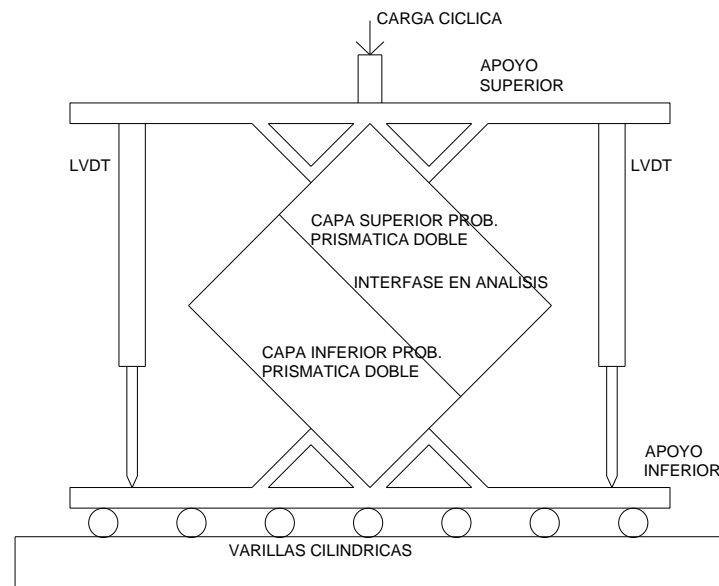


Figura 6-61. Esquema del ensayo a fatiga de la interfase del LEMaC
Fuente: elaboración propia

Para la confección de las probetas cúbicas dobles a ser ensayadas se implementa el siguiente procedimiento:

- Moldeo con la mezcla asfáltica patrón de dos probetas prismáticas de 30 cm x 30 cm x 5 cm. Para ello, se considera una Densidad de Referencia de 2,412 g/cm³. La compactación se realiza con el equipo *Roller Compact*.
- Simulación del fresado del Caso 4 mediante aserrado de la superficie de ambas probetas.

- Aplicación de las dotaciones de riego de las Situaciones 1 a 4 sobre las probetas, cubriendo media probeta con cada dotación.
- Moldeo de la capa superior sobre ambas probetas en un espesor de 5 cm, con la mezcla patrón y nuevamente mediante compactación con el equipo de *Roller Compact*.
- Aserrado de 3 probetas cúbicas de 10 cm de lado para cada Situación.
- Numeración de las probetas mediante la fórmula S_{X-Y} , donde la X corresponde a la Situación y la Y al Número de Probeta para esa Situación.

En la Figura 6-62 se puede ver una imagen de las dos probetas de base moldeadas mediante el compactador *Roller Compact*. En éstas se ha señalado el sentido de compactación, para que sea coincidente luego con el sentido de la simulación del fresado.



Figura 6-62. Bases para las probetas moldeadas con *Roller Compact*
Fuente: elaboración propia

En la Figura 6-63 se observan las probetas de base una vez que se les ha realizado la simulación del fresado mediante aserrado. Se puede ver en la imagen como se han delimitado los sectores de 15 cm x 30 cm destinados a la aplicación del riego para cada una de las Situaciones, es decir, la mitad de cada una de las probetas de base moldeadas.



Figura 6-63. Bases para las probetas con fresado simulado para el Caso 4
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 6-15 se vuelcan los cálculos correspondientes para las dotaciones de riego a ser aplicadas para la Situación 1 a 4.

Tabla 6-15. Riego para la Situación 1 a 4 en probetas prismáticas, Caso 4
Fuente: elaboración propia

Dotación óptima (l/m ²):	0,25				
PROBETAS	CIA	DOTACION CORREGIDA (l/m ²)	DOTACION EMULSION (g/m ²)	RIEGO (g)	
S ₁₋₁ a S ₁₋₃	1,760	0,44	696,2	31,3	Superficie: 15 cm x 30 cm
S ₂₋₁ a S ₂₋₃	1,507	0,38	596,1	26,8	AREA (cm ²): 450
S ₃₋₁ a S ₃₋₃	1,253	0,31	495,6	22,3	AREA (m ²): 0,045
S ₄₋₁ a S ₄₋₃	1,000	0,25	395,6	17,8	Res. Emulsion: 63,2%

En la Figura 6-64 se muestran las probetas dobles resultantes, luego de ser efectuada la capa de revestimiento.

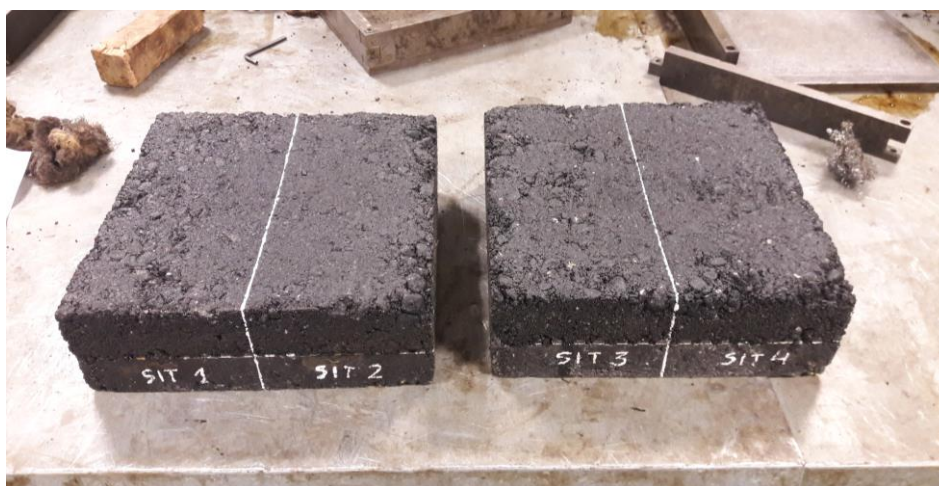


Figura 6-64. Probetas dobles prismáticas moldeadas
Fuente: elaboración propia

A partir de las probetas dobles prismáticas, y mediante el aserrado con hoja diamantada, se arriba a las 12 probetas cúbicas a ser ensayadas a la fatiga que se muestran en la Figura 6-65.

Sobre una de las probetas cúbicas logradas se practica un escaneo en alta resolución en la cara transversal a la dirección de fresado, que se observa en la Figura 6-66 para el caso de la Situación 1, que es la que presenta mayor dotación del riego. Puede verse en la imagen que la interfase se torna imperceptible a simple vista, lo cual puede tomarse como un indicio de la validez del procedimiento de moldeo adoptado. Cabe acotar que la imagen se ha insertado en este documento en escala real.

Se efectúa el análisis de dicha superficie de corte con lupa. En la Figura 6-67 se observa en la imagen de la izquierda la fotografía tomada con la lupa, y en la de la derecha como sobre esa fotografía se ha marcado la interfase en rojo. Por comparación entre ambas imágenes se puede ratificar que la interfase resulta casi imperceptible (para una idea de la escala considerar que la altura de fresado se encuentra en aproximadamente 5 mm).



Figura 6-65. Probetas cúbicas para el análisis a fatiga, Caso 4
Fuente: elaboración propia

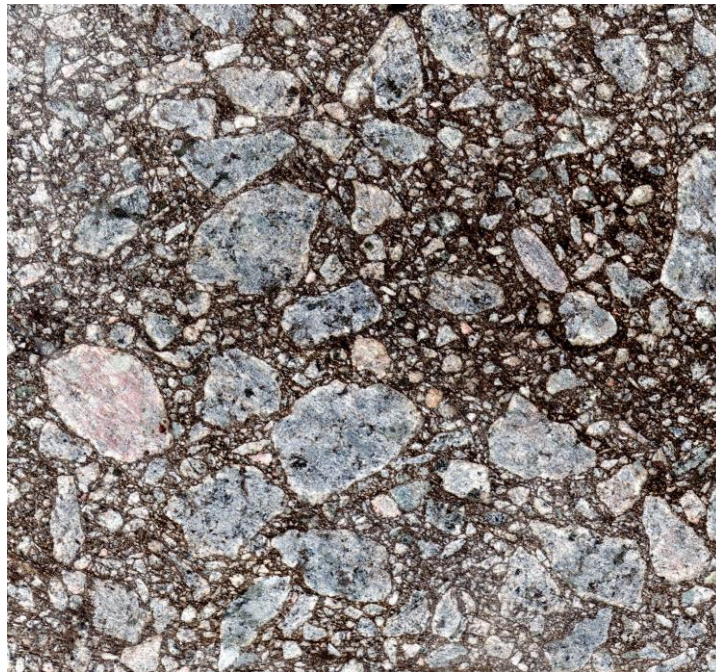


Figura 6-66. Escaneo en alta resolución de un corte en sentido transversal al fresado
Fuente: elaboración propia

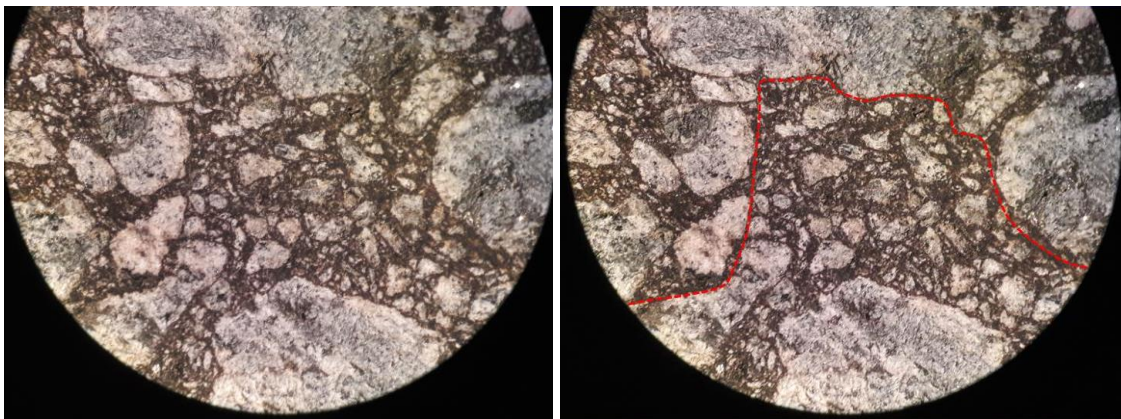


Figura 6-67. Imágenes con lupa de un corte en sentido transversal al fresado
Fuente: elaboración propia

6.8.1. Primera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar como primera serie a las probetas S_{1-1} , S_{2-1} , S_{3-1} y S_{4-1} , a la temperatura ya empleada en los ensayos estáticos de 20 °C, con un periodo de aplicación de la carga de 1 ciclo por segundo y con 100.000 repeticiones.

Las probetas son ensayadas de acuerdo al procedimiento descrito. En la Figura 6-68 se observan imágenes tomadas durante el ensayo de una de las probetas. En la imagen de la izquierda se ve una probeta dentro de la cámara de acondicionamiento y en la de la derecha el equipo completo (que incluye el regulador neumático de carga, la adquisidora de datos y la computadora con el programa de regulación del ensayo).



Figura 6-68. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas
Fuente: elaboración propia

Las probetas ensayadas dejan apreciar que la evolución en la deformación vertical registrada tiene su correlato en el desplazamiento de ambas capas en la interfase. Lo señalado se observa en las imágenes de la Figura 6-69, donde se ve a la izquierda la probeta ensayada no deformada, y en las imágenes de la derecha el desplazamiento entre las capas en la inferfase (ambas imágenes de la derecha son idénticas, sólo que en la superior se ha marcado con rojo la interfase para que sea más fácilmente perceptible).

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la primera serie de probetas se observa en la Figura 6-70.

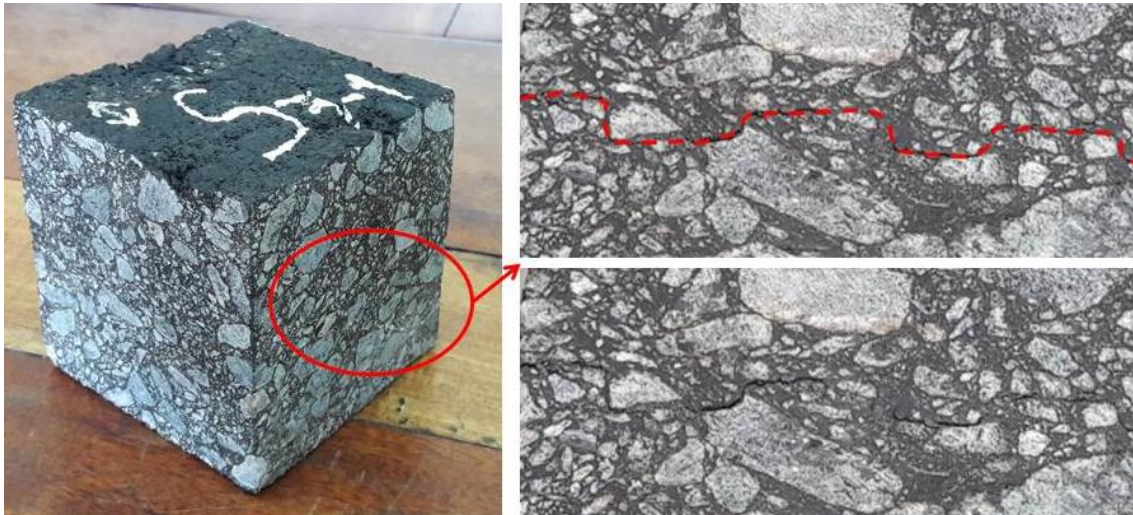


Figura 6-69. Detalle de una probeta ensayada a fatiga y su interfase
Fuente: elaboración propia

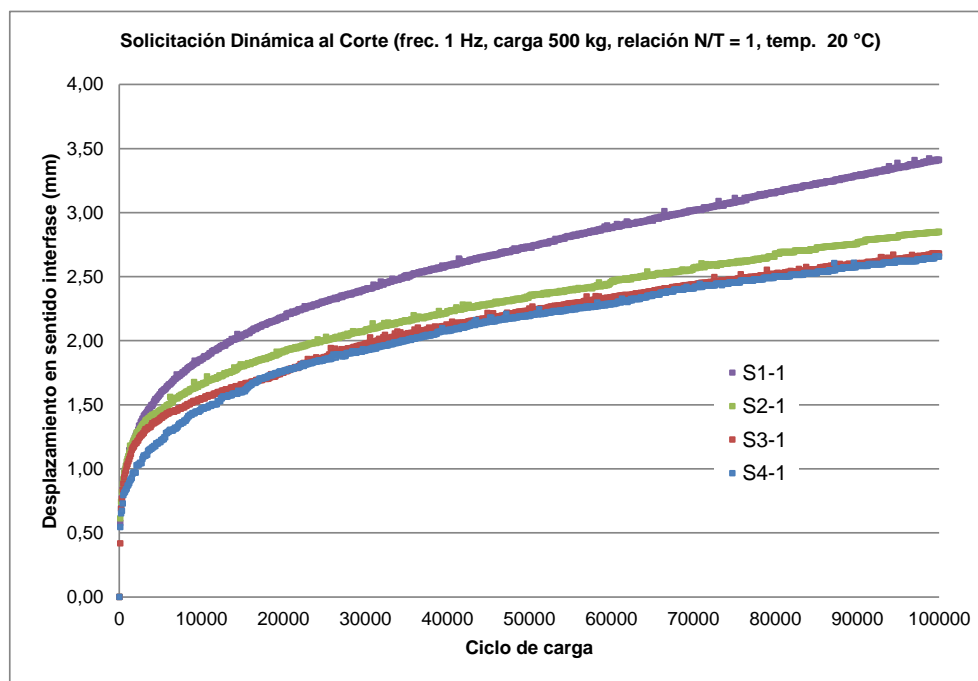


Figura 6-70. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la primera serie
Fuente: elaboración propia

Si bien las curvas volcadas en la Figura 6-70 permiten ver cierta tendencia en los resultados, para una más clara interpretación de éstos, se decide definir una Pendiente de la Curva de Desplazamiento (*PCD*) que se calcula de acuerdo a la Ecuación 6-4.

$$PCD = (D_{100} - D_{50}) / 50 \quad (6-4)$$

Donde:

PCD = pendiente de la curva de desplazamiento [mm/10³ ciclos]

*D*₁₀₀ = desplazamiento a los 100.000 ciclos de carga [mm]

*D*₅₀ = desplazamiento a los 50.000 ciclos de carga [mm]

A partir de la definición de este parámetro, se puede confeccionar la Tabla 6-16 en la cual se vuelcan los resultados obtenidos para la primera serie de ensayos.

Tabla 6-16. Resultados de la primera serie de probetas
Fuente: elaboración propia

Probeta	D_{50} (mm)	D_{100} (mm)	PCD (mm/10 ³ ciclos)
S ₁₋₁	2,73	3,41	0,0136
S ₂₋₁	2,35	2,85	0,0100
S ₃₋₁	2,23	2,68	0,0089
S ₄₋₁	2,20	2,66	0,0091

Los resultados muestran que, si bien la D_{100} en la probeta S₃₋₁ resulta levemente superior a la de la probeta S₄₋₁, las PCD obtenidas marcan una tendencia hacia el mínimo para la probeta S₃₋₁. Esto se condice con los resultados obtenidos ante las sollicitaciones estáticas, pues demostraría que la Situación 3 sería también, ante las condicionantes establecidas para esta primera serie de probetas, la que mejor respuesta daría ante las sollicitaciones dinámicas.

6.8.2. Segunda serie de ensayos a fatiga

La primera serie de ensayos demuestra una tendencia en los resultados coincidente con los obtenidos ante sollicitaciones estáticas. Se observa que la temperatura de ensayo y la frecuencia de carga seleccionadas requerirían de una cantidad de repeticiones en las sollicitaciones para llevar a las probetas a situaciones cercanas a la rotura marcadamente por encima de las analizadas. En tal sentido, cabe señalar que para la frecuencia establecida, los 100.000 ciclos de carga insumen más de 30 horas de ensayo, incluyendo el acondicionamiento de la probeta.

Se decide ensayar la segunda serie de probetas a una temperatura de ensayo de 40 °C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas asfálticas, como es el caso de la determinación de su Módulo Dinámico, para observar el comportamiento esperable a altas temperaturas. El resto de los parámetros, como la frecuencia de cargas y su amplitud, se decide dejarlos constantes.

Al ensayar las probetas se obtienen diferentes comportamientos. En la Figura 6-71 se observa la probeta S₁₋₂ ya ensayada, vista de perfil a la izquierda y con un detalle de la interfase a la derecha; en ambas imágenes se ve como la falla se ha producido claramente por el desplazamiento relativo de las capas en la interfase. Por su parte, en la Figura 6-72 se observa la probeta S₄₋₂ ya ensayada, con una vista de perfil a la izquierda y ese mismo perfil, pero con el camino de la fisura remarcado a la derecha; lo que deja ver que la falla se produce parte por el desplazamiento relativo en la interfase y parte por la rotura de la mezcla asfáltica. Se deduce en tal sentido, un mejor comportamiento ante las menores dotaciones de riego de liga analizadas.

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la segunda serie de probetas se observa en la Figura 6-73.

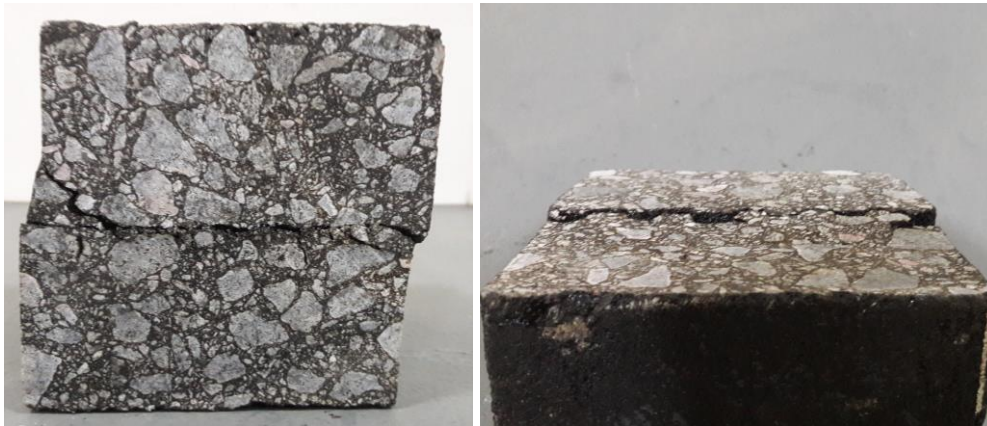


Figura 6-71. Imágenes de la probeta S₁₋₂ ya ensayada
Fuente: elaboración propia

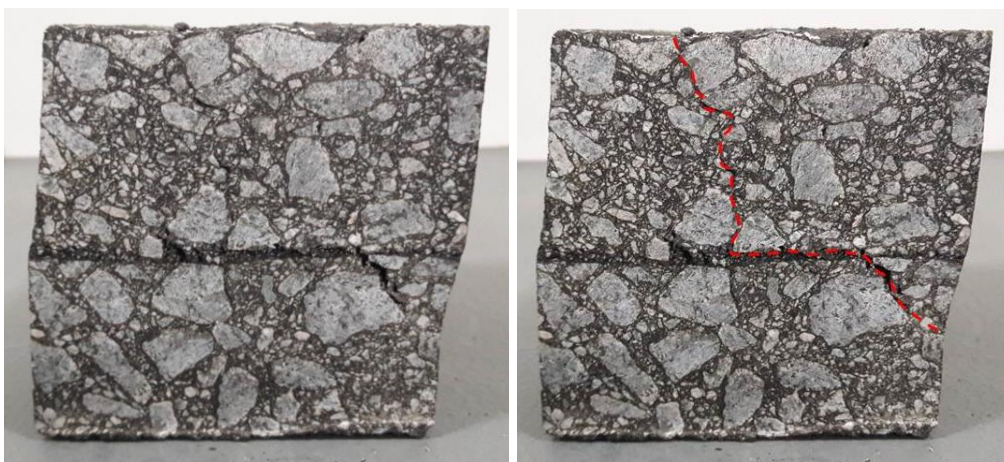


Figura 6-72. Imágenes de la probeta S₄₋₂ ya ensayada
Fuente: elaboración propia

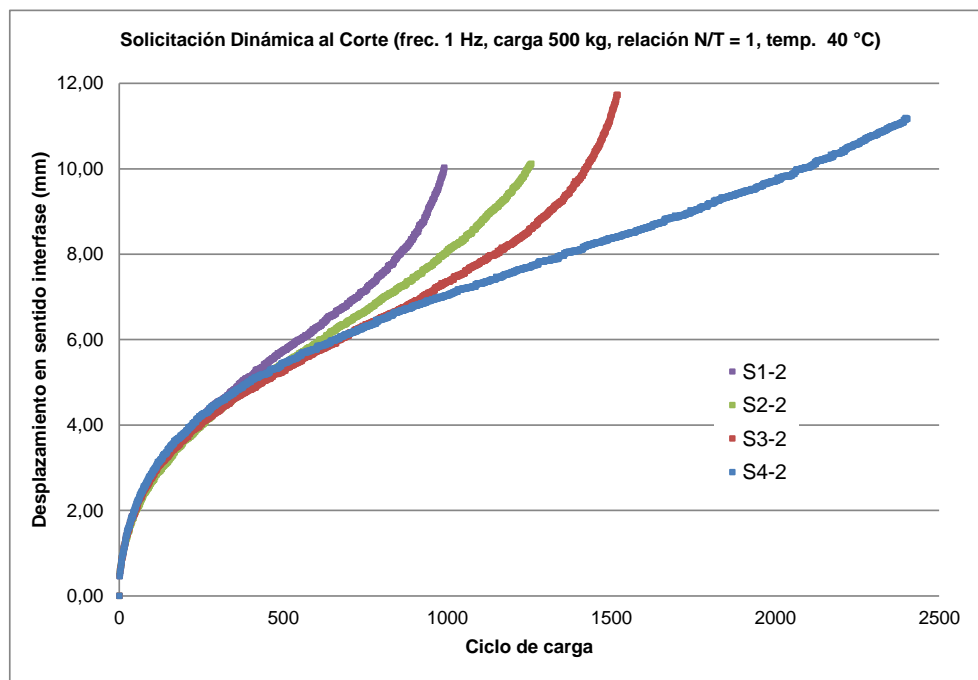


Figura 6-73. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie
Fuente: elaboración propia

Se puede ver en la Figura 6-73 la notoria diferencia de resultados respecto de los obtenidos para los 20 °C. Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas se decide analizar la cantidad de ciclos que se requieren para que en cada probeta se genere un desplazamiento de 5 mm (TD_{5mm}) y de 10 mm (TD_{10mm}). La Tabla 6-17 muestra los resultados obtenidos en tal sentido.

Tabla 6-17. Resultados de la segunda serie de probetas
Fuente: elaboración propia

Probeta	Para TD_{5mm} (ciclos)	Para TD_{10mm} (ciclos)
S ₁₋₂	374	990
S ₂₋₂	414	1246
S ₃₋₂	436	1422
S ₄₋₂	393	2081

Puede observarse como la cantidad de ciclos para los TD_{5mm} en todos los casos resulta similar, marcándose una diferencia en la cantidad de ciclos para los TD_{10mm} . En esta serie la situación óptima se da claramente en la probeta S₄₋₂, por lo que puede interpretarse que a temperaturas elevadas de operación, al menos para los materiales analizados, el mejor comportamiento de la interfase se da con menores dotaciones de riego de liga que a temperaturas de operación intermedias.

6.8.3. Tercera serie de ensayos a fatiga

Paso seguido, para observar el comportamiento esperable a bajas temperaturas, se resuelve ensayar la tercera serie de probetas a una temperatura de ensayo de 5 °C. Esto es habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas asfálticas, como es el caso de la determinación de su Módulo Dinámico. Adicionalmente, se modifica la frecuencia de cargas, estableciéndola en 2 ciclos por segundo.

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la tercera serie de probetas se observa en la Figura 6-74. En esta imagen se ve que las curvas de las probetas S₁₋₃ y S₂₋₃ no se muestran hasta los 100.000 ciclos debido a inconvenientes registrados en el equipo adquirente de datos durante el ensayo de las mismas; para el ensayo de las probetas S₃₋₃ y S₄₋₃ esos inconvenientes fueron solucionados.

Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas se decide volcar en la Tabla 6-18 los desplazamientos en la interfase para 35.000 ciclos (D_{35}), 50.000 ciclos (D_{50}) y 100.000 ciclos (D_{100}).

Tabla 6-18. Resultados de la tercera serie de probetas
Fuente: elaboración propia

Probeta	D_{35} (mm)	D_{50} (mm)	D_{100} (mm)
S ₁₋₃	0,86		
S ₂₋₃	0,74		
S ₃₋₃	0,57	0,60	0,65
S ₄₋₃	0,66	0,69	0,72

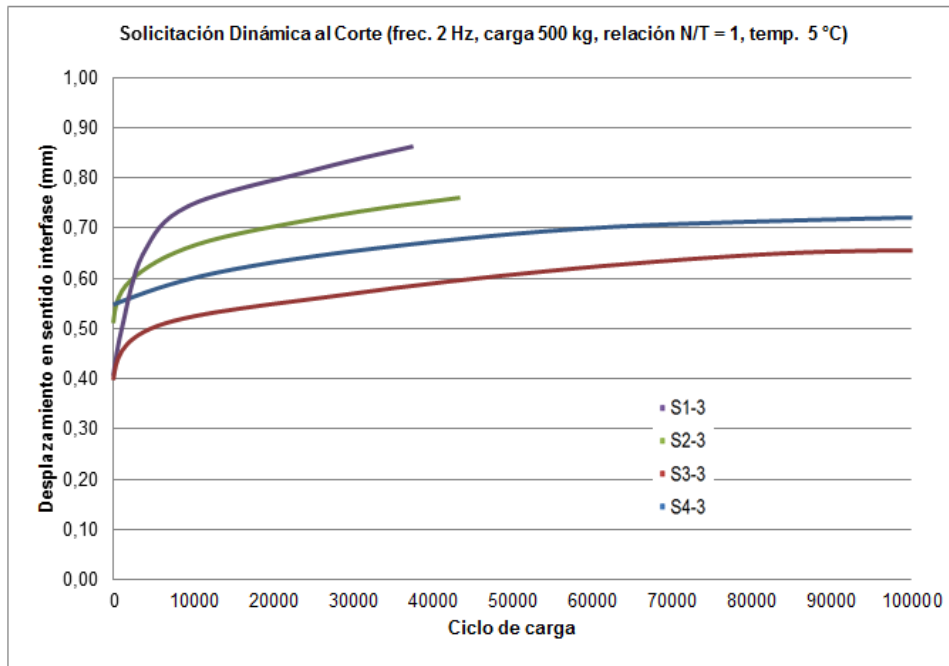


Figura 6-74. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie
Fuente: elaboración propia

Como se ve, a 5 °C los resultados obtenidos permitirían ratificar que la situación óptima es la Situación 3, lo cual coincide con lo establecido mediante los ensayos estáticos y los ensayos dinámicos a 20 °C. No obstante esto, se observa que las diferencias relativas entre los resultados para la Situación 3 y la Situación 4 se pueden deber también, principalmente, a los desplazamientos iniciales registrados en ambas probetas, lo que puede tener como causa un ajuste inicial de los platos de carga, habida cuenta de que se trata de sólo de algunas centésimas de milímetro.

Referencias

BELLO, M., "Apuntes de la capacitación sobre predicción y bondad de ajuste", Capacitaciones Software-Shop, Colombia, 2016.

ROMANOSCHI, S.A., "Characterization of Pavement Layer Interfaces", Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU, 1999.

BSI, "EN12697-26: Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt (Stiffness)", BSI Standards Publication, Inglaterra, 2012.

GIOVANON, O., BUONO, F., "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.

7. APLICACIÓN A CASOS REALES DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

Para analizar si lo modelado en laboratorio se ajusta a lo observable en la práctica, se decide efectuar estudios sobre dos obras viales en las cuales se aplique el fresado de la capa de rodamiento existente, con la presencia de un espesor remanente de mezcla asfáltica a ser reforzada. Uno de los estudios se realiza sobre materiales idénticos a los empleados en las experiencias en laboratorio, en una obra vial situada en la provincia de Buenos Aires. El otro se realiza sobre materiales diferentes a los analizados en laboratorio, y mediante la aplicación de una sistemática de ensayo distinta, relacionada con una obra efectuada en la provincia de Lérica (España).

7.1. Análisis de un caso en la Ruta Provincial N° 215 en Coronel Brandsen

La Ruta Provincial N° 215 (RP215) es una carretera de 109 km de extensión en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, que une el Canal Oeste en la ciudad de Ensenada y el empalme con la Ruta Nacional N° 3 en San Miguel del Monte, tal cual puede observarse en la Figura 7-1.

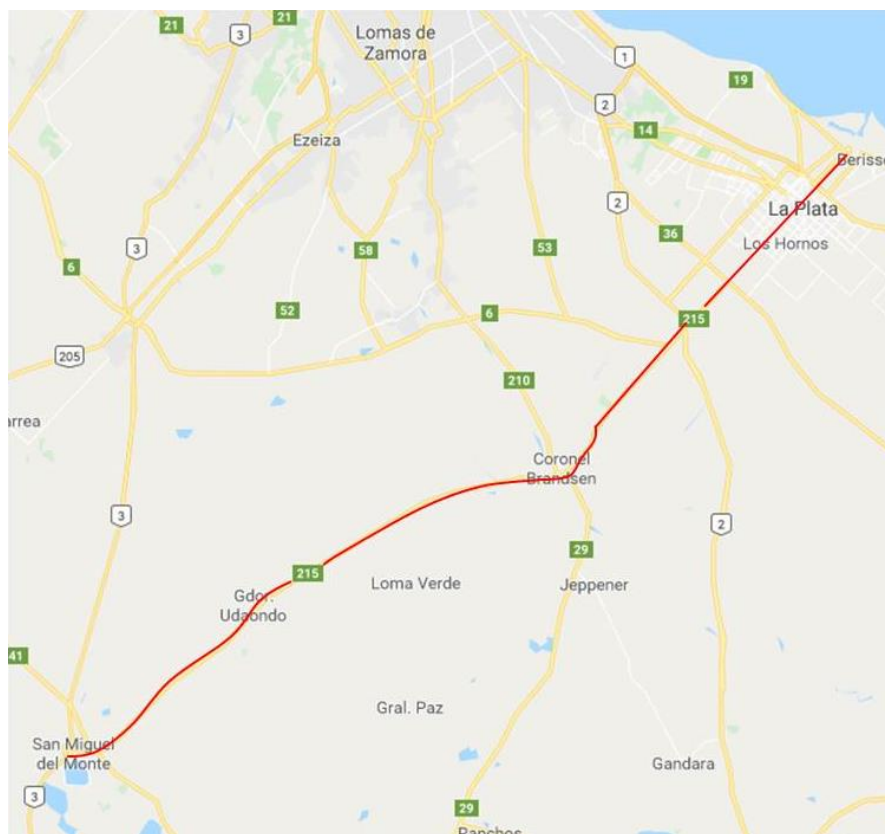


Figura 7-1. Trazado de la RP215

Fuente: www.google.com.ar/maps (adaptación propia)

En diciembre de 2017, esta ruta se encuentra sometida a una obra de ampliación y rehabilitación de calzada en su tramo entre las localidades de Coronel Brandsen y San Miguel del Monte. Entre los ítems que involucran dicha obra se encuentran los de fresado de la carpeta asfáltica existente en la calzada en sus 5 cm superficiales, la aplicación de un riego de liga asfáltico y la colocación de una capa asfáltica de refuerzo tipo CAC-D19, razón por la cual se la ha seleccionado para efectuar el análisis comparativo en obra respecto de lo observado en laboratorio. Por lo señalado, se contacta a representantes de la Empresa ICF, contratista de la obra, para solicitar la realización de los estudios. Se obtiene la aprobación correspondiente, previa

consulta a la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (DVBA), que posee jurisdicción en el tramo. Paso seguido, se realiza la visita a obra el día 07/12/17, en el sector inicial del tramo en cuestión (cercanía a la localidad de Coronel Brandsen), por haber sido recientemente sometido al fresado correspondiente. En la Figura 7-2 se observa la ubicación del punto seleccionado para realizar el análisis.



Figura 7-2. Sector en el cual se realiza el análisis
Fuente: www.google.com.ar/maps (adaptación propia)

En la Figura 7-3 se observa una vista general del sector y en la Figura 7-4 el espesor remanente de mezcla asfáltica luego del fresado (aproximadamente 8 cm), dispuesto sobre un pavimento de hormigón.



Figura 7-3. Vista general del sector analizado
Fuente: elaboración propia

En la Figura 7-5 se ve el equipo de fresado utilizado en la obra, como así también un detalle de su denominación comercial.

Como paso inicial se efectúan las determinaciones con la metodología análoga a la del Ensayo de Parche de Arena desarrollada, utilizando el volumen de 40 cm³ de arena establecido como óptimo. En la Figura 7-6 se observa una imagen general con las tres determinaciones realizadas sobre una misma línea de fresado.



Figura 7-4. Vista lateral del espesor remanente de mezcla asfáltica
Fuente: elaboración propia



Figura 7-5. Equipo de fresado utilizado en la obra
Fuente: elaboración propia



Figura 7-6. Determinaciones análogas al Ensayo de Parche de Arena efectuadas
Fuente: elaboración propia

De la Figura 7-7 a la Figura 7-9 se observan detalles de la medición de los D_i resultantes en las determinaciones 1 a 3, respectivamente.

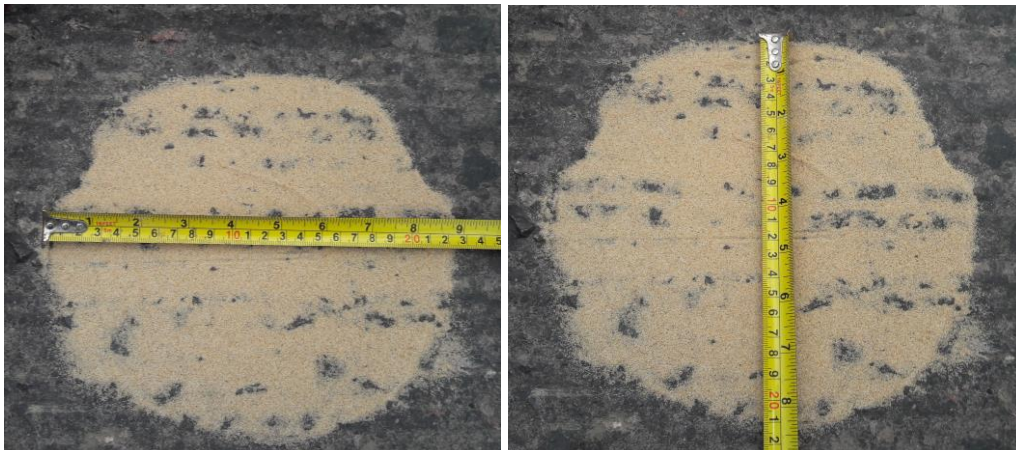


Figura 7-7. Medición de los D_i en la Medición 1
Fuente: elaboración propia

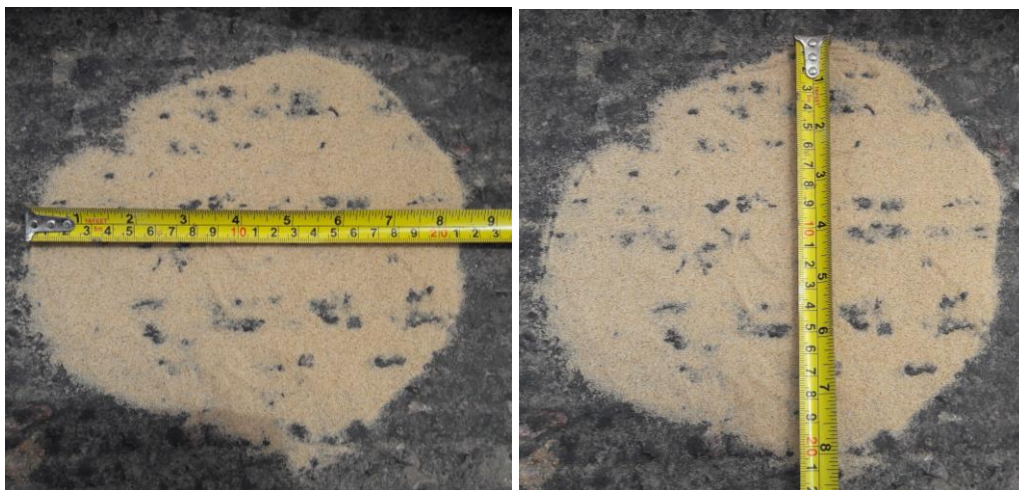


Figura 7-8. Medición de los D_i en la Medición 2
Fuente: elaboración propia

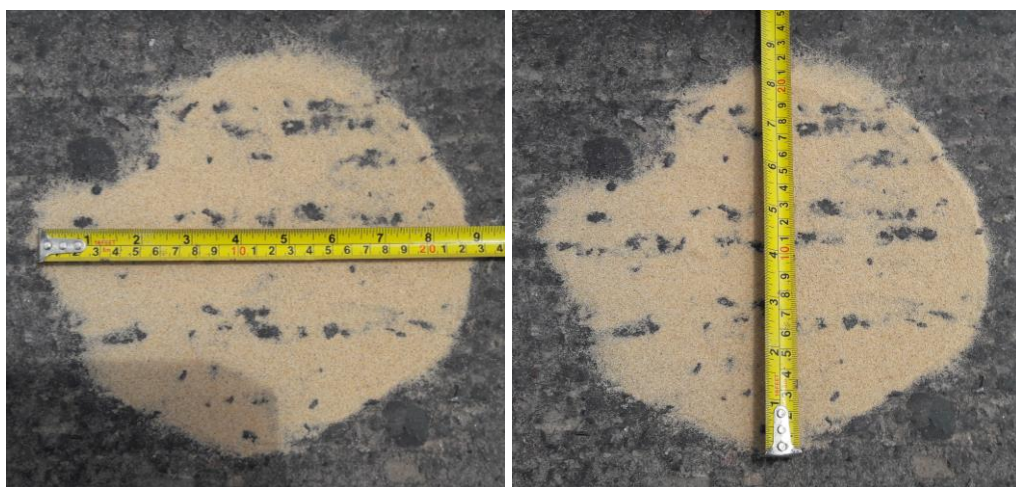


Figura 7-9. Medición de los D_i en la Medición 3
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7-1 se vuelcan los valores de DPA medidos y el DPA_{prom} resultante como promedio de esos.

Tabla 7-1. Determinación del DPA_{prom} a partir de los DPA medidos
Fuente: elaboración propia

Medición	D_1 (cm)	D_2 (cm)	DPA (cm)
1	22,0	21,0	21,5
2	21,5	21,0	21,3
3	21,5	22,5	22,0

DPA_{prom} (cm)
21,6

Paso seguido, se efectúa la extracción en una misma hilera de fresado, correspondiente al sector en el cual se realizaron las determinaciones anteriormente señaladas, de 9 testigos de 10 cm de diámetro de la mezcla asfáltica remanente. En la Figura 7-10 se observan imágenes tomadas durante la extracción de dichos testigos.



Figura 7-10. Extracción de testigos en el sector en análisis
Fuente: elaboración propia

Los testigos extraídos en la obra son acondicionados, mediante su corte con sierra circular diamantada, en un espesor de 5 cm, análogo al de las bases de las probetas dobles moldeadas en las experiencias en laboratorio. Durante esta tarea se tiene especial cuidado en generar un plano de corte paralelo al de fresado. En la Figura 7-11 se observan los testigos obtenidos por esta vía.

Al material sobrante del acondicionamiento por corte de los testigos se le realiza la determinación del contenido de cemento asfáltico y la recuperación de los agregados, mediante la aplicación combinada de una centrífuga de plato y una centrífuga de vasos, de acuerdo a lo establecido por el procedimiento LEMaC-A01/06 (LEMaC, 2016). Se obtiene como resultado un contenido de cemento asfáltico del 4,8 %. En la

Figura 7-12 se observan los áridos recuperados de la muestra, visualmente puede deducirse que se trata de una mezcla asfáltica típica de la zona, elaborada con árido granítico de trituración.



Figura 7-11. Testigos obtenidos acondicionados
Fuente: elaboración propia



Figura 7-12. Áridos recuperados de la mezcla asfáltica de los testigos
Fuente: elaboración propia

A estos áridos se les determina su curva granulométrica, la cual se compara con las curvas límites de una mezcla CAC-D19 de DNV (DNV, 2017), según se observa en la Tabla 7-2 y la Figura 7-13.

Por todos los datos recabados se arriba a la conclusión de que la mezcla asfáltica remanente en obra es una típica mezcla CAC-D19 de la zona, con similares características a la mezcla asfáltica utilizada en las experiencias de laboratorio.

Si bien para la obra se cuenta con una dotación del riego de liga a ser aplicado, constituido por una emulsión asfáltica CRR-1, se plantea para el análisis comparativo considerar las dotaciones utilizadas en las experiencias en laboratorio, como una vía para establecer la validación de los resultados obtenidos. Por esto, se decide moldear

probetas dobles, que tienen como base a los testigos extraídos y en las cuales se emplea para el riego de liga y la capa de revestimiento los mismos materiales utilizados durante las experiencias de laboratorio previas.

Tabla 7-2. Curva de áridos recuperados
Fuente: elaboración propia

Tamiz	Pasa Tamiz (%)		
	C. Min	CURVA	C. Max
25 mm (1")	100	100,0	100
19 mm (3/4")	83	92,3	100
9,5 mm (3/8")	60	68,1	75
4,75 mm (N°4)	42	51,0	60
2,36 mm (N°8)	29	36,4	47
600 μm (N°30)	15	20,1	29
300 μm (N°50)	11	13,8	21
75 μm (N°200)	4	4,9	8

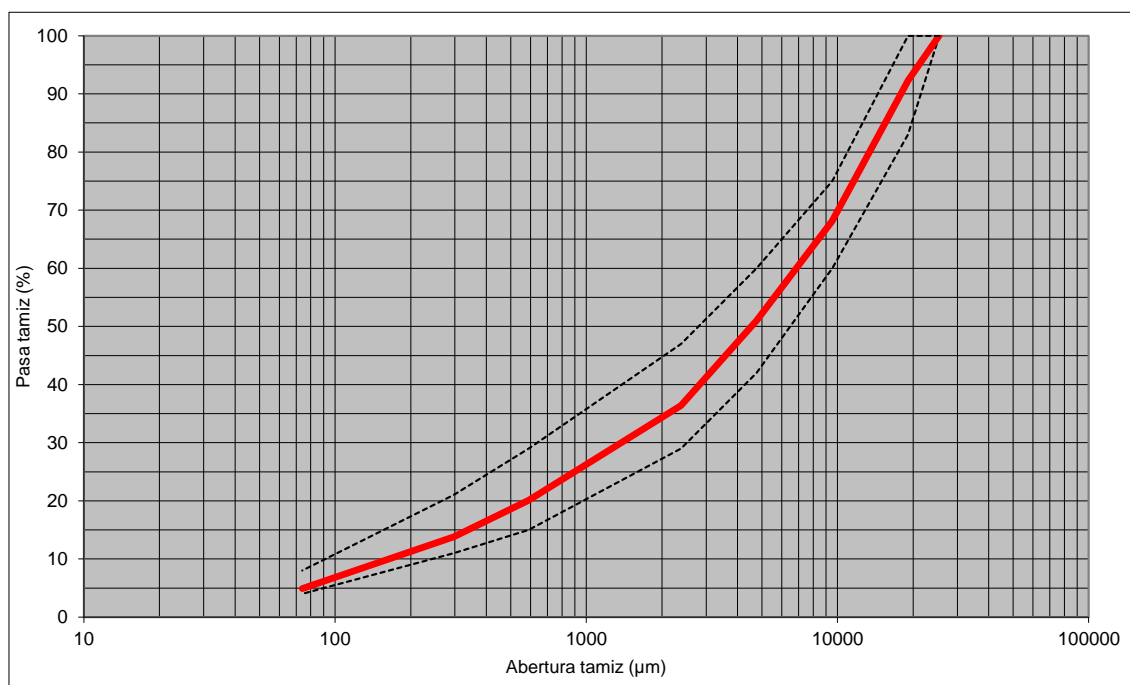


Figura 7-13. Gráfica de la curva de áridos recuperados
Fuente: elaboración propia

El análisis se realiza en laboratorio aplicando tres dotaciones, de forma tal de ver si se ratifican los resultados obtenidos en las experiencias previas, correspondientes a las situaciones de:

- Dotación I: dotación de riego de liga óptima establecida para la interfase en superficies lisas (es decir, la Situación 4).
- Dotación II: dotación de riego de liga establecida mediante la fórmula desarrollada para estimar el *CIR* (es decir, la Situación 3).
- Dotación III: dotación de riego de liga establecida mediante el incremento directo de la superficie de contacto en la interfase, es decir empleando el *CIA* (es decir, la Situación 1).

Las Dotaciones se aplican sobre tres de los testigos extraídos en cada caso. Los cálculos para establecer la cantidad de emulsión a ser utilizada en cada testigo se

observan en la Tabla 7-3. Para la determinación del *CIA* se emplea la Ecuación 4-6 y para la determinación del *CIR* la Ecuación 6-3, en ambos casos a partir del valor DPA_{prom} .

Tabla 7-3. Cálculos para establecer la cantidad de emulsión a aplicarse por testigo
Fuente: elaboración propia

DPA_{prom} (cm)	<i>CIR</i>	<i>CIA</i>
21,6	1,144	1,428

Dotación óptima (l/m^2):

0,25

DOTACION	PROBETAS	COEF	DOTACION CORREGIDA (l/m^2)	DOTACION EMULSION (g/m^2)	RIEGO (g)
I	101 a 103	1,000	0,25	395,6	3,1
II	104 a 106	1,144	0,29	452,7	3,6
III	107 a 109	1,428	0,36	564,7	4,4

DIAMETRO (cm):	10
AREA (cm^2):	78,5
AREA (m^2):	0,00785
Res. Emulsion:	63,2%

Las probetas dobles moldeadas, luego de haber sido aplicadas las dotaciones de riego calculadas, se muestran en la Figura 7-14; en la cual se observa en la columna de la izquierda las probetas correspondientes a la Dotación I, en la columna central las de la Dotación II y en la columna de la derecha las de la Dotación III.



Figura 7-14. Probetas dobles moldeadas a partir de los testigos extraídos
Fuente: elaboración propia

Las curvas resultantes y los parámetros en análisis obtenidos para las series de probetas ensayadas pueden verse de la Figura 7-15 a la Figura 7-17, correspondientes a las Dotaciones I a III, respectivamente. En las figuras puede apreciarse como las gráficas correspondientes a cada una de las probetas de la serie han sido desplazadas en el eje de las deformaciones, una distancia correspondiente a los 4,0 mm de deformación, de forma tal que puedan ser analizadas más fácilmente por evitarse su superposición.

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 26/02/2018 Hora: 12:41:05 Trabalho n° **0754**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	3,9	0,1	1,0
CP 2	5,1	0,2	1,5
CP 3	5,1	0,2	1,4
Número CPs	3	3	3
Média	4,738	0,1640	1,288
Mediana	5,120	0,1738	1,365
Desv.Padrão	0,6829	0,03308	0,2598
Coef.Var.(%)	14,41	20,17	20,17
Mínimo	3,950	0,1272	0,9987
Máximo	5,144	0,1911	1,501

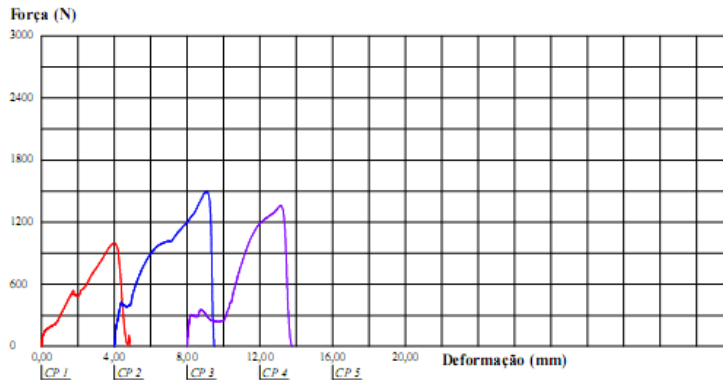


Figura 7-15. Resultados ensaio de corte Dotación I
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 26/02/2018 Hora: 13:12:28 Trabalho n° **0755**
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solicitação: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	3,3	0,2	1,7
CP 2	5,9	0,3	2,3
CP 3	7,1	0,3	2,1
Número CPs	3	3	3
Média	5,420	0,2625	2,062
Mediana	5,857	0,2722	2,138
Desv.Padrão	1,939	0,03972	0,3119
Coef.Var.(%)	35,78	15,13	15,13
Mínimo	3,299	0,2188	1,719
Máximo	7,102	0,2964	2,328

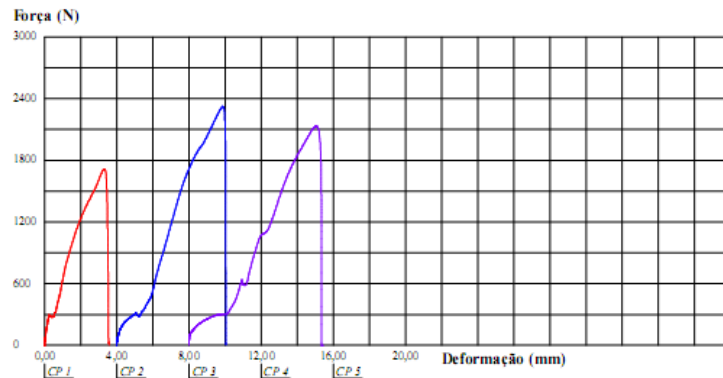


Figura 7-16. Resultados ensaio de corte Dotación II
Fuente: elaboración propia

UTN - FRLP
LEMaC

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL30000N Célula: Trd 26 Extensômetro: - Data: 26/02/2018 Hora: 13:35:21 Trabalho nº 0756
 Programa: Tesc versão 3.05 Método de Ensaio: Adherencia Frezado
 Ident. Amostra: >>>>>> Material: Mezcla asfáltica (sup fresada) Cliente: Julian Solitación: Adherencia entre capas

Corpo de Prova	Deformação @Força Max. (mm)	Tensão @Força Max. (MPa)	Força @Força Max. (kN)
CP 1	5,3	0,3	2,0
CP 2	2,9	0,2	1,5
CP 3	4,6	0,2	1,6
Número CPs	3	3	3
Média	4,285	0,2193	1,722
Mediana	4,648	0,2027	1,592
Desv.Padrão	1,282	0,03509	0,2756
Coef.Var.(%)	29,92	16,00	16,00
Mínimo	2,860	0,1956	1,536
Máximo	5,346	0,2596	2,039

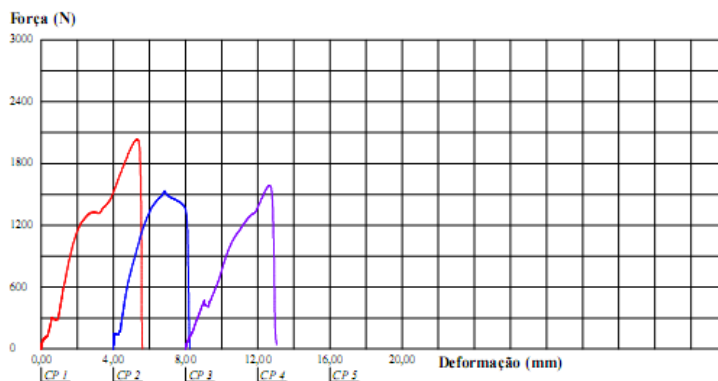


Figura 7-17. Resultados ensayo de corte Dotación III
Fuente: elaboración propia

En la Figura 7-18 se puede apreciar una probeta ya ensayada representativa de cada una de las dotaciones (Dotación I a III, desde abajo hacia arriba, respectivamente). La imagen permite ver como con la Dotación I la rotura se genera casi en su totalidad en el riego de liga, con la Dotación II existe una mayor proporción de la rotura generada parte en el riego y parte en la superficie de la base y con la Dotación III nuevamente una rotura producida mayoritariamente en el riego.



Figura 7-18. Probetas ensayadas de la Dotación I a III
Fuente: elaboración propia

El resumen de los resultados promedios se observa en la Tabla 7-4, donde se señala la tensión de corte máxima S_{max} y el desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 7-4. Resumen de los resultados de la Dotación I a III
Fuente elaboración propia

Dotación	S_{max} (MPa)	TD (mm)	CI
I	0,164	4,7	1,000
II	0,262	5,4	1,144
III	0,219	4,3	1,428

En la Figura 7-19 y la Figura 7-20 se observan las gráficas de S_{max} y TD versus CI , respectivamente.

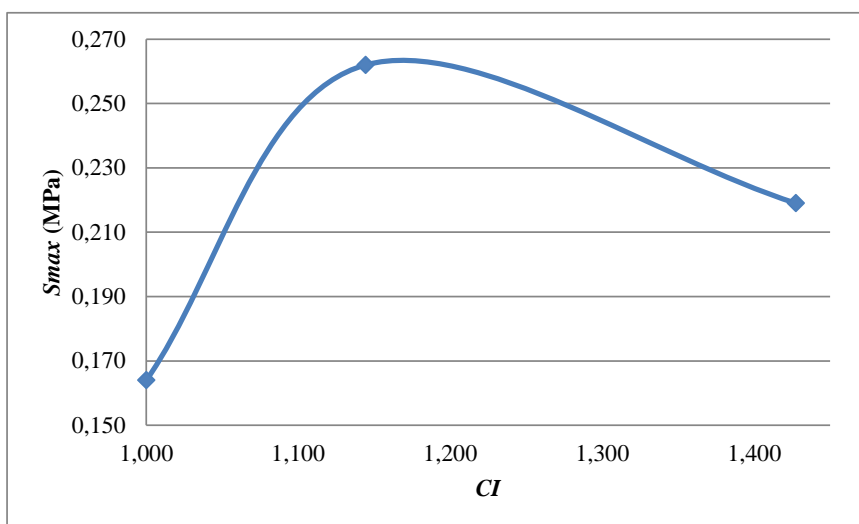


Figura 7-19. Gráfica S_{max} versus CI en la Dotación I a III
Fuente: elaboración propia

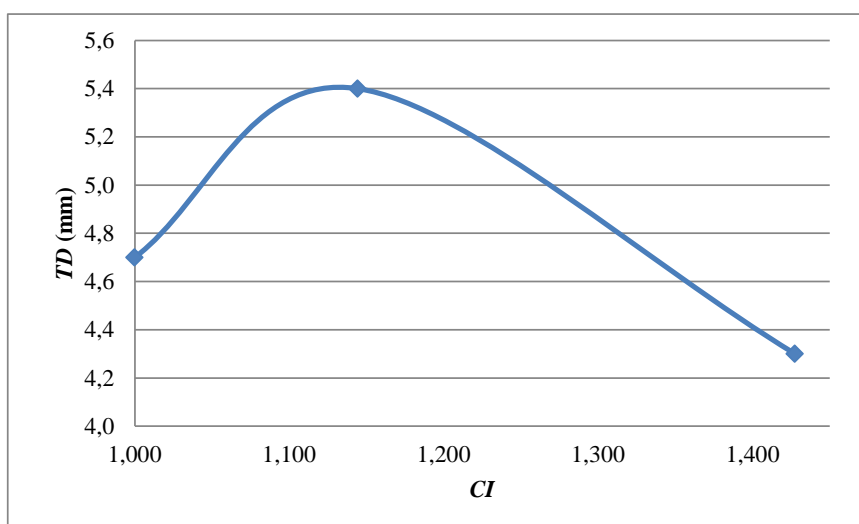


Figura 7-20. Gráfica TD versus CI en la Dotación I a III
Fuente: elaboración propia

A partir de éstas se ve que con la Dotación II, que surge de la aplicación del CIR de acuerdo al modelo desarrollado, se obtienen los mayores resultados promedio de S_{max} y TD ; a pesar de que no es posible establecer si se trata de la dotación óptima ajustada. Por lo expresado, estos resultados guardan relación con los logrados en las experiencias en laboratorio. Resulta pertinente pensar por ello, que la experiencia realizada valida los CIR obtenidos.

Además, habría en el estudio dos series de probetas que se pueden individualizar y comparar, pues responden a una misma tipología de materiales. Por un lado, están aquellas confeccionadas con un testigo de una capa asfáltica fresada de una obra existente como base y un revestimiento de carpeta asfáltica nueva moldeado en laboratorio. Por el otro, se encuentran las que poseen la capa de base (con fresado simulado por aserrado) y revestimiento nuevas moldeadas en laboratorio. Al analizar las resistencias al corte de ambas series, se ve que las primeras se encuentran por debajo de las segundas. Esto se condice por lo expresado por Berenguer et al. (2017), en cuanto a que los testigos dobles extraídos en campo dan generalmente menores resistencias al corte que las probetas dobles moldeadas en laboratorio.

7.2. Análisis de un caso en una obra en la provincia de Lérida (España)

En la provincia de Lérida, situada en la comunidad autónoma de Cataluña, es habitual la conformación de capas viales asfálticas que emplean áridos calizos y cementos asfálticos de baja penetración. A raíz de la existencia de un proyecto de investigación conjunto entre el LEMaC y el Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB) de la Universitat Politècnica de Catalunya, relacionado con la temática que aborda la presente tesis, se plantea la realización de una experiencia que haga uso de estos materiales, para observar la posible extrapolación de resultados en tal sentido. El proyecto en cuestión se encuentra aprobado por el Programa de Incentivos del Ministerio de Educación de la Nación, bajo el código IFI4708TC. Este proyecto está dirigido por el autor de la presente tesis y por el director de la misma, y cuenta con integrantes de las instituciones mencionadas (UTN, 2017).

Las mezclas asfálticas que constituyen el sistema a ser analizado, tanto en la capa de base fresada como en la de revestimiento, es del tipo de Concreto Asfáltico Semidenso de Tamaño Máximo 16 mm (AC16S), de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) de España. Este último establece que esta mezcla asfáltica debe responder a los límites granulométricos que se observan en la Tabla 7-5, presentar un contenido mínimo de cemento asfáltico de 4,5 % y estar colocada en espesores de entre 4 cm y 5 cm (BOE, 2015). También el PG-3 estipula las características a ser cumplidas por el riego de liga a ser utilizado, del tipo C60B3ADH.

Tabla 7-5. Límites granulométricos de una mezcla AC16S
Fuente: elaboración propia

TIPO DE MEZCLA / % PASA TAMIZ	ABERTURA DE LOS TAMICES NORMA UNE-EN 993-2 (mm)									
	45	32	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,063
AC16S	100	100	100	90-100	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	3-7

La formulación de la mezcla asfáltica se logra mediante un agregado grueso 8:16, un agregado intermedio 4:8, un agregado fino 0:4 y un cemento asfáltico 35/50. En la Tabla 7-6 se observa la dosificación utilizada.

Tabla 7-6. Dosificación empleada para la mezcla AC16S
Fuente: elaboración propia

Material	Contenido %
8:16	28,58
4:8	23,81
0:4	42,86
Asf. 35/50	4,75

De acuerdo a la empresa proveedora, los materiales cuentan con las características que a continuación se detallan:

- Agregado grueso 8:16
Cantera: FOJ (Vallirana, España)
Tipo: calizo triturado
Densidad de las partículas (g/cm^3): 2,5 – 2,7
Índice de Lajas < 15 %
Porcentaje de caras de fractura: 100 %
Desgaste Los Ángeles < 25 %
- Agregado intermedio 4:8
Cantera: FOJ (Vallirana, España)
Tipo: calizo triturado
Densidad de las partículas (g/cm^3): 2,5 – 2,9
Índice de Lajas < 15 %
Porcentaje de caras de fractura: 100 %
Desgaste Los Ángeles < 25 %
- Agregado fino 0:4
Cantera: FOJ (Vallirana, España)
Tipo: calizo triturado
Densidad de las partículas (g/cm^3): 2,4 – 2,8
Equivalente de Arena > 50 %
- Asfalto 35/50
Fabricante: CEPSA-PROAS
Peso específico: $1,03 \text{ g/cm}^3$
Penetración a 25 °C: 39 mm/10
Punto de ablandamiento: 53,6 °C
Índice de Penetración: -0,9

En la Figura 7-21 se observan muestras de los agregados en cuestión utilizados en la confección de las mezclas asfálticas a ser empleadas en la experiencia.



Figura 7-21. Agregados calizos utilizados en la experiencia
Fuente: elaboración propia

La emulsión asfáltica empleada para el riego de liga es del tipo C60B4ADH, la cual presenta una velocidad de rotura menor a la C60B3ADH, con un residuo de cemento asfáltico del 60 % y una penetración del asfalto residual (en 0,1 mm) de 180-200.

A partir de estos materiales y dosificación, se moldean las probetas dobles con interfase lisa correspondientes a las dotaciones de residuo asfáltico del riego de liga de 200 g/m^2 , 300 g/m^2 , 400 g/m^2 , 500 g/m^2 , 600 g/m^2 y 800 g/m^2 , a razón de tres probetas por dotación. Dado lo que se estila en España, se emplean las dotaciones expresadas en unidad de peso por unidad de superficie. De todos modos, como el problema a resolver es de tipo volumétrico, si se desea analizar las dotaciones en l/m^2 no hace falta más que afectarlas por la densidad del residuo de cemento asfáltico declarada. Para este moldeo se utiliza el sistema de compactación de martillo percutor, montado sobre un pie de compactación, que se hace actuar sobre la capa a compactarse durante 2 minutos y que se observa en la Figura 7-22.



Figura 7-22. Equipo para la compactación de laboratorio
Fuente: elaboración propia

Las probetas así moldeadas se analizan en su resistencia al corte mediante el Ensayo LCB adaptado a la potencial existencia del fresado en la interfase. Para ello se realiza el desmolde parcial de la probeta doble, hasta lograr una posición de ésta que permita el desarrollo de una luz de 15 mm a ambos lados de la interfase; es decir, entre la interfase y el molde y entre la interfase y el apoyo. Luego, se llevan durante al menos 4 horas al acondicionamiento a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en cámara, de acuerdo a lo que se observa en la Figura 7-23.

Las probetas se ensayan finalmente mediante la metodología especificada. En la Figura 7-24 se observa una imagen tomada durante la realización de un ensayo y en la Figura 7-25 se ve una probeta ya ensayada, aún en la cámara de la prensa de ensayo.

Se obtienen, una vez ensayadas las probetas, los resultados promedio que se observan en la Tabla 7-7 y la gráfica de la Figura 7-26.



Figura 7-23. Probetas en acondicionamiento a 20 °C
Fuente: Christian Selk



Figura 7-24. Equipo de Ensayo de LCB
Fuente: elaboración propia



Figura 7-25. Probeta ensayada en el equipo LCB
Fuente: Christian Selk

Tabla 7-7. Resultados de los ensayos al corte con interfase lisa
Fuente: elaboración propia

Dotación (g/m ²)	S_{max} (MPa)	TD (mm)
200	0,868	1,21
300	0,904	1,24
400	0,923	1,17
500	0,923	1,28
600	0,912	1,17
800	0,754	1,32

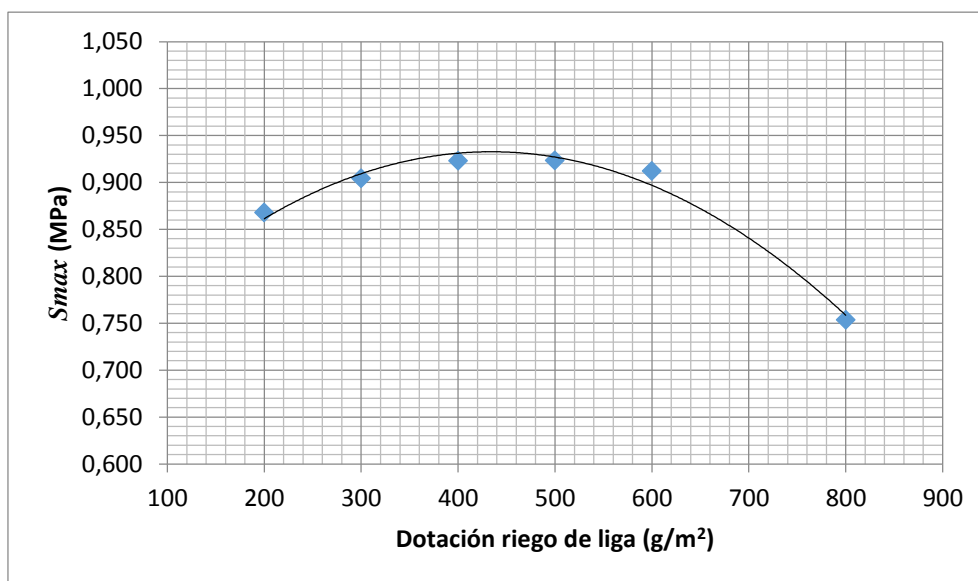


Figura 7-26. Resistencia al corte versus dotación de riego, interfase lisa
Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo que se aprecia en la Figura 7-26, se establece para esta sección del estudio un contenido óptimo de riego de liga para la interfase lisa de 400 g/m². De todos modos, se observa también en esta imagen que el rango de ese contenido óptimo resulta notoriamente más amplio que el registrado mediante la sistemática de ensayo empleada con materiales locales en el LEMaC. Esto puede deberse a dos factores importantes, relacionados con la reología del ligante asfáltico implicado. Uno de ellos es que la penetración del cemento asfáltico residual del riego de liga utilizado es elevada, lo cual implica un importante componente viscoso en su comportamiento a la temperatura de 20 °C de ensayo. El otro aspecto es que la velocidad de ensayo de 2,5 mm/min es el doble que la de 1,27 mm/min empleada en las experiencias en el LEMaC. En relación a este último, cabe recordar que a mayor velocidad de ensayo se obtienen resultados mayores de resistencia al corte y menores de desplazamiento, lo cual no facilita la visualización de las diferencias relativas entre los diversos contenidos de dotación de riego de liga empleados.

A continuación se procede a trasladar este contenido óptimo de riego de liga para la interfase lisa a una experiencia de obra análoga a la efectuada en el punto anterior. Para eso se tramita el acceso a un tramo de prueba de fresado superficial de una capa asfáltica realizada con los materiales en estudio. Dicho tramo de prueba, ubicado como ya se expresara en la provincia de Lérida, se encuentra en las instalaciones del obrador que la empresa Benito Arnó e Hijos SAU posee en el municipio de Alfarrás. En la Figura 7-27 se observa una vista del mismo, una vez efectuado el fresado en julio de 2018.



Figura 7-27. Detalle de la textura del tramo en estudio una vez fresado superficialmente

Fuente: Benito Arnó e Hijos SAU

En la Figura 7-28 se puede observar a la izquierda la realización de las mediciones con parche de arena de la textura del tramo y a la derecha la extracción de los testigos a emplearse en la continuidad del estudio.



Figura 7-28. Medición de Parche de Arena y extracción de testigos en el tramo en estudio

Fuente: Benito Arnó e Hijos SAU

Los testigos extraídos son acondicionados en laboratorio mediante su aserrado en un espesor de 5 cm, tal cual se observa en la Figura 7-29.



Figura 7-29. Testigos numerados y acondicionados en espesor
Fuente: elaboración propia

Luego, se procede a establecer las Dotaciones análogas a las situaciones analizadas en el punto anterior, para ser aplicadas sobre tres de los testigos extraídos en cada caso. Los cálculos para estimar la cantidad de emulsión a ser utilizada en cada testigo se observan en la Tabla 7-8. Para la determinación del *CIA* se emplea la Ecuación 4-6 y para la determinación del *CIR* la Ecuación 6-3, en ambos casos a partir del valor DPA_{prom} que se sitúa en 15,9 cm. En los testigos se ha medido un diámetro promedio de 9,7 cm.

Tabla 7-8. Cálculos para establecer la cantidad de emulsión a aplicarse por testigo
Fuente: elaboración propia

DPA_{prom} (cm)	<i>CIR</i>	<i>CIA</i>
15,9	1,211	1,618

Dotación óptima (g/m^2):

400

DOTACION	PROBETAS	COEF	DOTACION CORREGIDA (g/m^2)	RIEGO (g)
I	1 a 3	1,000	400,0	4,9
II	4 a 6	1,211	484,2	6,0
III	7 a 9	1,618	647,2	8,0

DIAMETRO (cm):	9,7
AREA (cm^2):	73,9
AREA (m^2):	0,00739
Res. Emulsion:	60,0%

Las dotaciones son aplicadas a los testigos, de acuerdo a lo que puede verse en la Figura 7-30.

Paso seguido, se moldean las probetas dobles, las cuales una vez que se han enfriado son desmoldadas parcialmente para lograr la ubicación de la interfase en el punto intermedio de los 30 mm dejados de luz entre el borde del molde y el apoyo, según se observa en la Figura 7-31.



Figura 7-30. Testigos con el riego de liga aplicado
Fuente: elaboración propia



Figura 7-31. Probetas dobles parcialmente desmoldadas para su ensayo
Fuente: elaboración propia

Entonces, se procede al ensayo de las probetas, obteniéndose curvas de esfuerzo al corte versus desplazamiento en la interfase, como la que se observa en la Figura 7-32, perteneciente a la Probeta 5, a manera de ejemplo. Se ve cómo la pérdida de carga se da de manera más lenta que en los ensayos efectuados con el procedimiento desarrollado para el estudio. Esto deja en evidencia la existencia de ciertas diferencias en la aplicación de ambas metodologías de análisis.

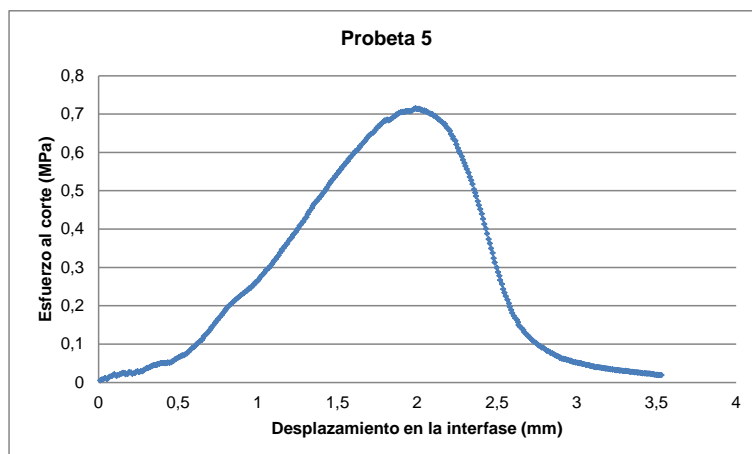


Figura 7-32. Curva de esfuerzo al corte vs. desplazamiento en la interfase, Probeta 5
Fuente: elaboración propia

Mediante los ensayos se obtuvieron los resultados que se observan en la Tabla 7-9. Para el cálculo de estos valores se ha dejado de lado los correspondientes a la Probeta 1, debido a dificultades presentadas por la misma durante su acondicionamiento, aplicación del riego de liga y moldeo de la capa de revestimiento. También se han descartado los resultados obtenidos con la Probeta 8, porque luego de realizado el ensayo se ha podido determinar, en forma visual por la rotura obtenida, que el sentido de los surcos no ha respetado adecuadamente el paralelismo con el sentido de ensayo previsto. Esto se deduce al observar que, en esta probeta, se produjo la rotura de la capa de revestimiento en un ángulo oblicuo al sentido de los surcos, sin que ello se percibiera en las restantes probetas, según se puede ver en la Figura 7-33.

Tabla 7-9. Resultados de las probetas dobles con interfase fresada
Fuente: elaboración propia

Dotación	CIR	Probeta	S_{max_i} (MPa)	S_{max} (MPa)	TD_i (mm)	TD (mm)
I	1,000	2	0,838	0,847	1,69	1,67
		3	0,855		1,65	
II	1,211	4	0,851	0,804	1,29	1,82
		5	0,715		1,99	
		6	0,845		2,17	
III	1,618	7	0,655	0,742	1,71	1,48
		9	0,829		1,25	



Figura 7-33. Probeta 8 ensayada, base (izq.) y revestimiento (der.)
Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos permiten deducir que el contenido óptimo de riego de liga debería ubicarse entre la Dotación I y la Dotación II, más cerca a la primera. De todos modos, se observa que estos valores logrados sólo deben ser tomados de manera indicativa, dado lo limitado de las muestras analizadas; razón por la cual se deduce la necesidad de profundizar los conocimientos en tal sentido en futuros estudios asociados.

Referencias

BERENGUER, J.M., CALVO, C., MOLINA, J., GOMARIZ, R., PEÑA, J.L., “El ensayo de adherencia de capas de firme según NLT-328/08. Estudio comparativo de los resultados obtenidos con los dispositivos A y B”, XIX Congreso Ibero-latinoamericano del Asfalto, Medellín, Colombia, 2017.

BOE, “Orden FOM/2523/2014 del Ministerio de Fomento”, Boletín Oficial del Estado, número 3, sección III, página 584, 3 de enero, España, 2015.

DNV, “Pliego de especificaciones técnicas generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos”, Dirección Nacional de Vialidad, Argentina, 2017. [Consultado en julio de 2017 en: http://www.vialidad.gov.ar/sites/default/files/PETG_1.pdf]

LEMaC, “Guía de metodologías y procedimientos para uso vial desarrollados en el LEMaC - Centro de Investigaciones Viales (edición 2016)”, Editorial edUTecNe (ISBN 978-987-1896-51-6), Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2016.

UTN, “Disposición SCTyP UTN: 338/2017 de aprobación del proyecto de I+D código IF14708TC”, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2017. [Consultado en octubre de 2018 en: <http://csu.rec.utn.edu.ar/docs/php/busquedaAvanzada.php3?tipo=DIS>]

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De manera previa a las conclusiones, se pueden citar una serie de aspectos relevantes, que fueran abordados en la presente tesis.

Durante la explotación de un pavimento flexible se desarrollan actividades dirigidas a su rehabilitación. De esta manera se elimina, en ocasiones, parte de la capa de rodamiento por medio de técnicas de fresado, lo cual permite reducir la influencia del ahuellamiento y otros deterioros superficiales de la capa existente. Además, se evita por esta vía el fenómeno de recrecido.

Esta tarea requiere el uso de equipos rotatorios de fresado, provistos de herramientas de desbaste que pueden presentar diferentes características, dando lugar a distintos grados de textura, que difieren de aquella de la superficie original, pues esta última en términos relativos puede considerarse "lisa".

Previo a la colocación de la capa de refuerzo, corresponde disponer un riego de liga de una emulsión asfáltica para generar una adecuada interfase, a fin de que si el pavimento existente presenta una buena condición estructural, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tránsito no afecten la vida útil prevista.

La existencia del fresado puede incidir en la determinación de la dotación óptima del riego de liga a aplicarse, pero existen pocos estudios que hayan abordado la temática, por lo que es necesario efectuar un análisis en tal sentido.

Asimismo, se han detectado una serie de condicionantes, que ameritan ser recapitulados, en función a la importancia que tienen respecto del objeto de las investigaciones realizadas y de las conclusiones obtenidas.

El vínculo entre la superficie existente y la capa de refuerzo en caliente aplicada, depende fundamentalmente de la cantidad de ligante asfáltico residual del riego de liga efectuado con una emulsión asfáltica (parámetro mediante el cual se expresa la dotación en cuestión).

Los equipos de fresado dan origen a diversos resultados de textura superficial, que abarcan profundidades de fresado que se encuentran entre 1 mm y 8 mm y distancias entre surcos que se ubican entre 8 mm y 25 mm. En vista a los estudios se estableció una escala de seis casos patrones de fresados a ser considerados, en función de los rangos de estos dos parámetros mencionados.

El análisis estructural de la interfase que se realice se encuentra condicionado al modelo estructural que se emplee. Específicamente en los pavimentos flexibles multicapas, las solicitaciones del tránsito introducen tensiones en la estructura que son absorbidas por el conjunto de las distintas capas, desde la capa de rodamiento hacia las capas inferiores de la estructura y la subrasante, por lo que un adecuado modelado de la interfase lleva a optimizar los costos de una rehabilitación si considera la incidencia del fresado y sus características en cada caso en particular.

Los modelos mecánicos de interfases expresan la relación entre el desplazamiento de corte a lo largo del plano de la interfase y los esfuerzos normales y de corte. Ante solicitaciones estáticas hasta rotura, existen antecedentes de investigadores que han obtenido gráficas de las curvas típicas de esfuerzo de corte vs. desplazamiento, en estudios de interfases entre capas asfálticas.

Dada la naturaleza cíclica de la carga en las interfases de un pavimento, sólo los sectores elásticos y el sector de fricción del ensayo estático hasta la rotura son empleados en su descripción. En la primera etapa, el desplazamiento de corte (o desplazamiento relativo de las dos capas en la interfase) es proporcional a la fuerza de corte (modelo de Goodman), proporcionalidad proveniente del módulo de reacción de la interfase K en la dirección horizontal. El módulo K en el modelo constitutivo se da hasta el esfuerzo de corte máximo S_{max} ; pudiéndose simplificar el análisis al acotarlo a una temperatura de referencia representativa y al considerar que sólo en los casos sin riego de liga se observa que el módulo K difiere fuertemente con el nivel del esfuerzo normal aplicado. Entonces, se puede pensar en un modelo resumido, con

un punto de falla S_{max} a un determinado desplazamiento al corte TD , a partir del cual comienza la interacción de fricción simple, caracterizada por el coeficiente de fricción μ , cuya determinación queda por fuera del alcance de la presente tesis.

Se selecciona para su aplicación el ensayo que solicita al corte directo por desplazamiento en forma paralela a la interfase del riego de adherencia en el sentido de la tracción de la prensa utilizada. Para este ensayo pueden establecerse como condiciones de entorno el generar el esfuerzo cortante en el plano a evaluar a una velocidad de avance controlada de 1,27 mm/min, una temperatura de ensayo de 20 °C, el empleo de probetas dobles cilíndricas de 100 mm de diámetro y 100 mm de altura (dos capas de 50 mm unidas por una interfase en análisis). Estas últimas moldeadas al aplicar la compactación con pisón Marshall. Además, se instrumenta un curado del riego de liga estandarizable en laboratorio, mediante el uso de una estufa a una temperatura de 60 °C.

En el ensayo, para permitir el desarrollo de la interfase fresada, se pueden separar los zunchos que toman la parte superior e inferior de la probeta doble unos 30 mm. De esta forma, se genera, además de la deformación propia registrada en la interfase, una deformación relacionada con la probeta en este sector. Por ello, los resultados de TD y de S_{max} a ser obtenidos en esta tesis, sólo son comparables en forma relativa entre sí y no con los generados mediante otras metodologías de ensayo.

8.1. Conclusiones

8.1.1. Respecto del Objetivo General:

Mediante esta tesis se ha podido investigar la aplicación óptima de los riegos de liga sobre pavimentos asfálticos fresados, a fin de su refuerzo con capas asfálticas en caliente, en base a particularidades de los materiales utilizados más frecuentemente en la zona central de la Argentina, y su implicancia estructural.

8.1.2. Respecto de los Objetivos Particulares

En cuanto a establecer una metodología de estimación del incremento de la superficie en función de la textura producida por el proceso de fresado en la capa de pavimento asfáltico a ser reforzada:

- Se concluye que se puede contar con los resultados de los incrementos de área $\Delta(Area)$ al fresar una superficie, registrados ante diversas combinaciones de ancho y profundidad del surco (es decir sus valores medios y dispersiones). Los mismos pueden establecerse, por ejemplo, mediante simulación numérica. Con estos valores, se pueden hallar modelos de regresión respecto de los diámetros obtenibles del empleo de una metodología de ensayo análoga a la del Parche de Arena, aplicados en esas situaciones simuladas. Lo expuesto, permitiría la estimación en futuras aplicaciones de los $\Delta(Area)$ a partir de diámetros registrados en obra.
- Se puede arribar a valores representativos de ancho y profundidad del surco (y su variabilidad) basados en observaciones de campo de los fresados a ser considerados. Estos pueden definirse por sus medias μ y sus desvíos estándar σ , por presentar una distribución asimilable a la normal.
- Es posible establecer, a partir de los análisis, que la fórmula que permite estimar el coeficiente del incremento del área CIA , es decir la proporción entre la superficie en la interfase fresada respecto de dicha superficie en los casos de interfase lisa, en función del diámetro del parche de arena DPA resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es $CIA = 5,03 DPA^{-0,41}$.

- La correlación se corrobora en laboratorio sobre probetas de los 6 casos representativos establecidos, al simular mediante el uso de una hoja diamantada los distintos grados de fresado. Luego, se establecen los *DPA* en forma ortogonal y promedio. Estos últimos se toman de referencia para cada uno de los casos de estudio.
- No obstante, esta corroboración permite confirmar que se introdujo al considerar un perfil de fresado simplificado un grado de error respecto del perfil real, debido a volúmenes en más y en menos que son dejados de lado en dicha consideración. De todos modos, debido principalmente a que luego los resultados se contrastan con respuestas óptimas desde el punto de vista mecánico, se considera a los efectos de esta tesis que el grado de precisión alcanzado en tal sentido es suficiente.
- Se observa un grado de similitud notorio al comparar un corte que proviene de un testigo extraído en obra, luego del proceso de fresado, y una sección lograda mediante la simulación del fresado en laboratorio mediante aserrado. Esto también da validez a la metodología de trabajo implementada a lo largo de la tesis.

En cuanto a analizar la dotación óptima requerida de riego de liga en función de los materiales a ser empleados, cuando la interfase es del tipo no fresada:

- Para poder analizar la influencia del incremento de la superficie de la interfase en los sistemas abordados, se debe contar con una dotación de riego de liga para el caso de la no existencia del fresado en la interfase (superficie “lisa”).
- Para eso es posible establecer una tipología de materiales en estudio representativa, constituida por una emulsión asfáltica catiónica de corte rápido y una mezcla asfáltica, tanto para la constitución del sustrato inferior como superior, del tipo Concreto Asfáltico en Caliente convencional Denso con Tamaño Máximo de sus agregados de 19 mm (CAC-D19).
- Mediante el empleo de la sistemática de ensayo diseñada, al analizarse diversas dotaciones de riego de liga, se establece para la tipología de materiales en estudio una dotación óptima a $0,25 \text{ l/m}^2$, por implicar la máxima S_{max} alcanzable.
- La especificación técnica aplicable en la jurisdicción nacional en Argentina contempla una sistemática de ensayo que posee diferentes características que la aplicada en el desarrollo de la tesis. Por ello, se verificó con la realización de ensayos complementarios la dotación de riego establecida como óptima. Se deduce que corresponde a una situación que implicaría el cumplimiento de los valores fijados por el pliego de DNV.

En cuanto a analizar cómo esa dotación óptima debe o no ser corregida, en función de la magnitud del incremento de superficie cuando la interfase es del tipo fresada:

- Para el desarrollo de la tesis se debe establecer si en las interfases fresadas resulta necesario incrementar la dotación del riego de liga en forma proporcional al aumento de área generado por la realización de esta tarea. Esto se debe a que un incremento excesivo en la dotación del riego de liga no se distribuye en forma homogénea sobre la superficie fresada, debido al grado de fluidez de la emulsión. En tal sentido, se ve que se genera un depósito de mayor espesor en el valle de los surcos, según se puede verificar en laboratorio.
- Es posible analizar situaciones que representan un aumento de la dotación en distintas proporciones del incremento del área de contacto en la interfase por el fresado mediante el ensayo al corte desarrollado. Se consideró para ello

que, dado que la flexión principal del pavimento se da en su sentido longitudinal y que el fresado presenta su superficie dentada también en este sentido, los ensayos se deben realizar con las probetas dobles dispuestas de acuerdo a esa orientación.

- Los resultados obtenidos permiten establecer que los coeficientes de incremento de riego *CIR* óptimos se obtienen al incrementar la dotación 1/3 del incremento de superficie en la interfase.
- Lo señalado oportunamente, en cuanto a la diferencia positiva de volumen de arena implicada al introducir el perfil de fresado simplificado adoptado respecto al que posiblemente involucre el perfil real, es posible que también explique en parte el por qué existiría una sobreestimación del *CIA* respecto del *CIR*. Más allá de eso, los análisis realizados permiten la obtención de *CIR* que implican una respuesta mecánica óptima; por lo que, a los efectos de su aplicación, no resulta indispensable establecer qué proporción de la diferencia entre el *CIA* y el *CIR* se debe a lo señalado y qué proporción a la acumulación de riego en exceso en los surcos del fresado.
- Cabe destacar que los resultados de *Smax* obtenidos para las interfases fresadas resultan apenas superiores a los obtenidos para el caso de la interfase lisa en su dotación óptima. Este aspecto parece implicar que en ambos casos la situación óptima refleja la rotura del sistema conformado por ambas capas, al cual la existencia del fresado y la mayor superficie de interfase implicada sólo aportarían un componente menor de resistencia adicional.
- Se puede ajustar por regresión con un coeficiente de determinación R^2 de 0,99, la fórmula que permite finalmente establecer el *CIR* en función del *DPA*, para un volumen de arena de 40 cm³, la cual es $CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184}$.
- Al registrarse en una obra diversos tramos homogéneos de superficie fresada a ser reforzada, puede aplicarse la fórmula obtenida de diferentes modos. Uno de los modos se basa en la determinación, por algún medio directo, de la dotación óptima a utilizarse en el caso de una interfase entre superficies lisas y en el ajuste de dicha dotación, en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado. Otros de los modos contempla el ensayar probetas dobles confeccionadas a partir de testigos extraídos en tramos de prueba de la carpeta de rodamiento existente, luego de haber sido aplicado un fresado sobre dicha superficie (con las correspondientes mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena desarrollada). De esta forma, puede aplicarse sobre esa dotación establecida el modelo desarrollado en forma inversa para establecer, virtualmente, la dotación óptima de riego de liga para la interfase lisa. Finalmente, se ajusta la misma, en función de la realización de mediciones con la metodología análoga al Parche de Arena y la aplicación del modelo desarrollado, en cada tipología de tramo homogéneo registrada en obra.
- De la aplicación preliminar del análisis al corte mediante solicitaciones dinámicas de carga, se puede deducir que existen indicios en tal sentido que son consistentes con los resultados obtenidos mediante la aplicación estática de la carga, pero que en regiones donde las temperaturas predominantes disten significativamente de los 20 °C, sería adecuado conducir esos análisis a otra temperatura de referencia, pues es posible que se obtengan resultados diferentes en cuanto a la dotación óptima del riego de liga.
- Es posible efectuar estudios sobre una obra vial con tipologías de materiales similares a las de los estudios de laboratorio. En estos se aplica el fresado de la capa existente en sus 5 cm superficiales, un riego de liga y una capa asfáltica de refuerzo tipo CAC-D19. La dotación se establece a partir de determinaciones con la metodología análoga a la del Ensayo de Parche de

Arena y el modelo desarrollados. Se obtienen así resultados coincidentes con los de laboratorio; lo cual sirve como una vía de validación de este último.

- En aplicaciones sobre materiales notoriamente diferentes a los empleados en las experiencias y/o con metodologías de ensayo que disten de la desarrollada, es posible obtener resultados no totalmente coincidentes con los de laboratorio, razón por la cual se requiere conducir estudios adicionales en tal sentido.

8.2. Recomendaciones

Dado los diversos aspectos abordados y los resultados arribados a lo largo del desarrollo de la tesis, surgen una serie de recomendaciones a ser tenidas en cuenta en futuros análisis que traten la temática. Se enumeran aquellas que se consideran de mayor relevancia:

- Profundizar el análisis en lo referido a la manera de representar en los diseños estructurales de rehabilitaciones sobre pavimentos flexibles, el grado de adherencia generado en la interfase, en función de la textura resultante en la misma.
- Buscar de introducir criterios de fallas a fatiga de las interfases entre capas asfálticas en estos sistemas de diseño estructural mencionados.
- Establecer adecuadas correlaciones entre las diversas tipologías de ensayos existentes con sollicitación al corte de la interfase, tanto ante cargas estáticas como dinámicas, a fin de poder contar con parámetros de referencia comparativos.
- Analizar la correlación entre el régimen de temperaturas de la zona de emplazamiento de una obra vial y la temperatura de ensayo de la interfase, tanto ante cargas estáticas como dinámicas, a fin de establecer la dotación óptima del riego de liga a ser empleado en dicha obra; sobre todo cuando se presuponen temperaturas características alejadas de los 20 °C, establecidos como de referencia en la presente tesis.
- Corroborar ante diversos materiales empleados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, en obras viales ubicadas en otras zonas de la Argentina o países de la región, si la proporción de incremento del riego de liga en función del aumento de la textura determinado en esta tesis, resulta también en la situación óptima desde el punto de vista de la respuesta mecánica de la interfase. En caso de no ser así, realizar los análisis en base a la metodología análoga al Ensayo de Parche de Arena desarrollada, como base para futuros análisis comparativos en tal sentido, a partir de proporcionalidades diferentes de dicha relación para diversas tipologías de materiales, o grupos de ellos.

ANEXO A – EL FRESADO DE PAVIMENTOS

Equipos de fresado

Frecuentemente, la nomenclatura del modelo del equipo de fresado se refiere al ancho del cilindro fresador. Algunos fabricantes lo especifican en centímetros y otros en milímetros, ya que no existe convención en tal sentido. Más allá de eso, el ancho del cilindro da una idea del tamaño del equipo de fresado, lo cual permite dividirlos como de pequeño, mediano y gran porte (Bonfim, 2008):

- Equipos de fresado de pequeño porte: son equipos destinados al fresado de remates junto a diversas interferencias existentes en los pavimentos. Antiguamente, una de las grandes dificultades en los servicios de fresado era ejecutar esos tipos de remates. Hoy en día para facilitar esta tarea han sido introducidos los equipos de pequeño porte. Estos son utilizados sobre todo para la ejecución de pequeñas intervenciones, en puntos definidos como remiendos, terminaciones alrededor de tapas de hierro, junto a desagües, entre otros; dado que por su tamaño son mucho más versátiles. Los equipos de pequeño porte generalmente también poseen una correa transportadora para la carga del material fresado simultáneamente en camiones basculantes. En la Figura A-1 se observa una fresadora de pequeño porte.



Figura A-1. Fresadora de pequeño porte
Fuente: catalogo.emsamaquinaria.es

- Equipos de fresado de mediano porte (Figura A-2): se destinan a la ejecución del fresado tanto de pequeñas como de grandes áreas. En términos de productividad, cuando se fresan grandes áreas los modelos anteriores tienen su desempeño modesto y no ideal para la ejecución de remates. Los nuevos equipos, con cilindros del mismo ancho, a pesar de que tampoco son los ideales para la ejecución de remates, presentan un buen desempeño cuando la faena del trabajo ofrece buenas condiciones para la ejecución del fresado. Trabajan sin muchas interrupciones y, cuando es utilizado en calles estrechas, tienen mayor versatilidad en las maniobras. Poseen una correa transportadora para la carga del material fresado en camiones basculantes, simultáneamente a la ejecución del fresado.
- Equipos de fresado de gran porte (Figura A-3): son destinados al fresado de grandes áreas por tratarse de equipos con cilindro fresador con ancho mayor que el de los anteriormente citados. Indicados para lugares que ofrecen buenas condiciones para el perfecto desarrollo de los trabajos, sin mucha interferencia,

como en calles anchas, grandes avenidas y sobre todo en carreteras. A causa de su tamaño, se debe evitar el exceso de maniobras con el equipo, lo que sería perjudicial tanto desde el punto de vista de la productividad como de los problemas al tránsito local. No obstante, ya existe un gran avance en tal sentido.



Figura A-2. Fresadora de mediano porte
Fuente: www.cat.com



Figura A-3. Fresadora de gran porte
Fuente: www.sdmleveling.ru

Los cilindros fresadores

El principal componente de los equipos de fresado, por sus funciones e importancia en la operación, es el cilindro fresador (Bonfim, 2008). Conocido en inglés como *milling drum*. Se trata de un tambor rígido construido en acero especial, en el que los dientes de corte son fijos, lo cual varía de un fabricante a otro. También se lo conoce como rodillo fresador o tambor fresador. El sistema de corte del equipo es básicamente el mismo para todos los modelos. Los equipos poseen el cilindro fresador que gira en alta rotación y, cuando es puesto para cortar, genera el desbaste del espesor del pavimento. Los cilindros fresadores son accionados por intermedio de cadenas, correas o motores hidráulicos, lo cual depende del modelo y del fabricante. La mayoría de los cilindros poseen los dientes de corte dispuestos en forma de V, resultado del dibujo formado por dos helicoides a partir de la parte media del cilindro. Esto hace que el material fresado, a causa del giro, sea conducido hacia el centro de la caja del cilindro fresador. De esta manera se facilita su lanzamiento a la correa transportadora durante el fresado. Algunos modelos poseen cilindros con un único helicoide, lo cual

hace que el material fresado sea dirigido hacia un lado, y de ahí sea lanzado sobre la correa transportadora.

Inicialmente las fresadoras presentaban solamente un tipo de cilindro según la rugosidad resultante en el pavimento, el modelo para fresado estándar, lo que ha evolucionado a cilindros con menor espaciado entre los dientes de corte, con la disminución de la profundidad de los surcos y la mejora de la textura resultante en el pavimento. De esta forma aparece el fresado fino, introducido para reducir la rugosidad en su aplicación en lugares en los que se pretende dejar la superficie fresada expuesta al tránsito, como en los trabajos de regularización superficial del pavimento y mejora de la adherencia neumático-pavimento.

La Figura A-4 y la Figura A-5 ilustran dos cilindros fresadores, para fresado estándar y fresado fino, y presentan esquemáticamente la posición de ataque de los dientes de corte, de 15 mm y 8 mm, respectivamente.

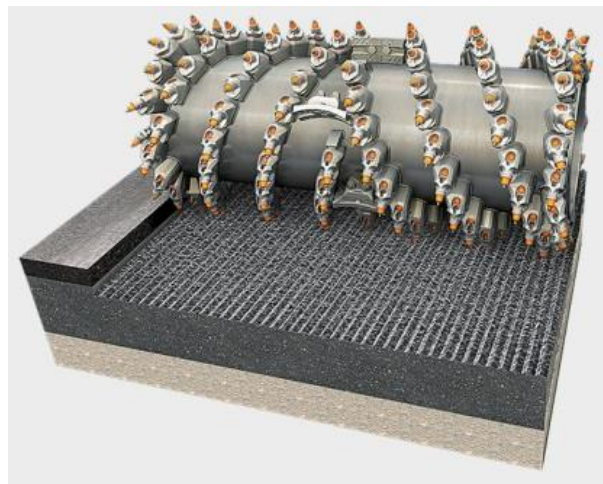


Figura A-4. Cilindro de fresado estándar
Fuente: www.wirtgen.de

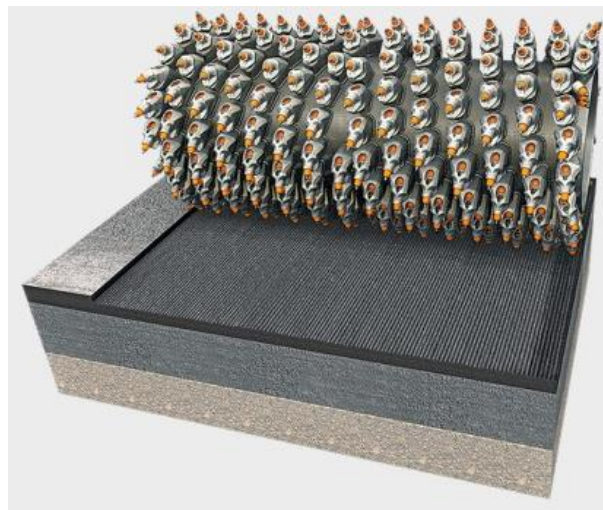


Figura A-5. Cilindro de fresado fino
Fuente: www.wirtgen.de

El fresado fino trae otras ventajas al compararlo con el fresado estándar, como es el caso de la posibilidad de la aplicación de un microaglomerado asfáltico polimerizado, reduciendo el espesor necesario de material, por presentar una superficie menos rugosa.

La actuación del cilindro fresador en el pavimento se hace en sentido anti horario, conforme ilustra la Figura A-6. En la misma se ve la aplicación en el caso de un reciclado. Al trabajar de este modo, los dientes de corte (o *cutting tools* en inglés) actúan directamente en el pavimento y lo desbastan.

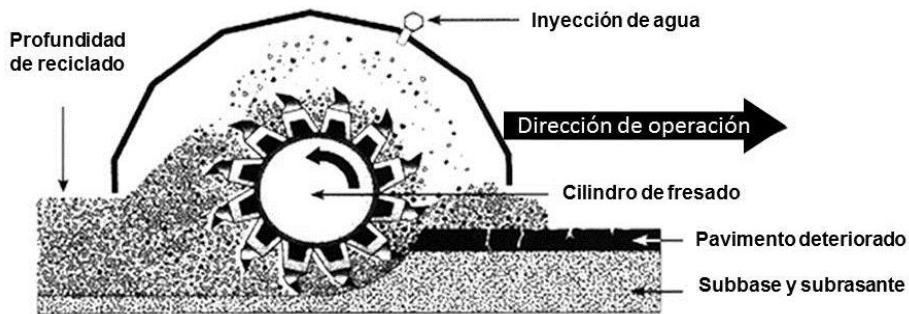


Figura A-6. Sentido de giro del fresador
Fuente: www.rustonpaving.com (traducción propia)

Los dientes de corte están compuestos por cuerpos forjados en acero, con punta de material más duro, de carburo de tungsteno y cobalto. Poseen un anillo cilíndrico que envuelve su base para que los mismos estén fijos bajo presión en el interior del soporte, permitiendo que giren libremente durante el proceso de fresado, de forma tal que se desgasten por igual. La Figura A-7 presenta un diente de corte utilizado para el fresado patrón de las fresadoras en frío.



Figura A-7. Diente de corte
Fuente: www.riotrack.com

El barrido posterior del fresado

Después del fresado sobre la superficie del pavimento quedan materiales sueltos, finos o granulados, que requieren ser removidos previo a la aplicación del riego de liga (Balbo, 1997). Es por esto que tras la realización del fresado se debe barrer la pista para retirar los materiales sueltos sobre la superficie fresada. Tal procedimiento puede ser realizado en forma manual o mecánicamente:

- Barrido manual: requiere de gran cantidad de obreros con escobillones, palas y carretillas para la realización de los trabajos. No es muy eficaz, pues es muy difícil retirar todo el material fino depositado sobre una superficie rugosa. Otro

factor desfavorable al barrido manual es que expone a los obreros a riesgos, dado que la mayoría de las veces los trabajos son ejecutados con tránsito de vehículos en carriles contiguos.

- Barrido mecanizado: resulta más eficiente tanto por el resultado en el pavimento como por el hecho de que no limita el buen aprovechamiento del equipo de fresado, especialmente considerando los aspectos de seguridad. Por otra parte, se requiere menor número de obreros durante la operación. Existen equipos específicos para barrido, como el modelo presentado en la Figura A-8, además de accesorios que son adaptados a otros equipos que son muy empleados para este tipo de tarea, según se observa en la Figura A-9.



Figura A-8. Equipo de barrido
Fuente: hevco.co



Figura A-9. Accesorio para barrido
Fuente: www.impomaqrental.com

Tanto con el barrido manual como en el ejecutado mecánicamente, con ocasión de una rehabilitación asfáltica, es recomendado complementariamente el uso de un compresor de aire para retirar el resto del material fino de la superficie (PMAM, 2013).

Referencias

BONFIM, V., "Fresado de pavimentos asfálticos", Editorial Exceção, primera edición, Brasil, 2008.

BALBO, J.T., "Pavimentos asfálticos, patologias e manutenção", São Paulo, Plêiade, Brasil, 1997.

PMAM, "Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs", Pavement Maintenance and Advanced Materials, University of Utah, EEUU, 2013. [Consultado en web marzo de 2017: pavemaintenance.wikispaces.com/2013-Bond+Strength+by+Tom].

ANEXO B – ENSAYOS PARA CONTROLAR LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS

De la gran cantidad de ensayos asignables a la medición de la adherencia entre capas, se efectúa un listado de aquellos más representativos, especificando algunas particularidades de cada caso. Existen en algunas de las tipologías que se señalan variantes de los ensayos en cuanto a detalles menores, razón por la cual no se citan en su totalidad los relevados de la bibliografía existente.

Ensayo Francesio

El ensayo desarrollado por Francesio (1969) consta de solicitar a un espécimen de ensayo al corte simple o directo con la aplicación de una presión normal nula. El mismo da como resultado una resistencia tangencial inicial o reducida, ya que cuantifica la porción físico-química de la adhesión. Los especímenes de ensayo están confeccionados por dos capas, cada una correspondiente a distintos estratos del paquete estructural de un pavimento, en el medio de las cuales se coloca una dotación variable del riego de liga. Dicha probeta se solicita al corte directo mediante la utilización de la prensa del ensayo Marshall, como se observa en la Figura B-1. La velocidad de avance del ensayo es de 50 mm/min y la temperatura de 35 °C. La ecuación de tensión tangencial que se aplica al mencionado ensayo es la mostrada en la Ecuación B-1.

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (B-1)$$

Donde:

- τ = resistencia a las tensiones tangenciales [kg/cm²]
- P = carga aplicada [kg]
- A = área transversal de la probeta [cm²]

Resulta de relevancia señalar (Francesio, 1969):

- La importancia de la cuantificación de la adherencia entre capas de un pavimento.
- La dificultad de correlacionar resultados obtenidos sobre especímenes de laboratorio y especímenes de obra.
- Las ventajas de los tramos experimentales.
- Que el exceso en los riegos de liga puede traer aparejado resultados no deseables. Esto hace que incluso en determinados casos particulares no sea necesario.
- Las ventajas de la utilización de emulsiones asfálticas como riego de liga.

Ensayo de corte del Laboratorio de Caminos de Barcelona (LCB)

El Ensayo LCB consiste en aplicar sobre una probeta cilíndrica, o un testigo calado del pavimento, un esfuerzo de corte por flexión (Perez Jiménez et al., 2001); de tal manera, que se pueda determinar la resistencia a las tensiones tangenciales dada por la Ecuación B-2.

$$\tau = \frac{P/2}{A} = \frac{P/2}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

(B-2)

Donde:

τ = resistencia a las tensiones tangenciales [kg/cm²]

P = carga aplicada [kg]

A = área transversal de la probeta [cm²]

La aplicación de las cargas se puede materializar mediante el sistema de apoyos mostrado en el esquema de la Figura B-2. La carga se aplica por medio de una prensa con una velocidad de avance controlada, la cual se ha establecido en 2,50 mm/min. Este tipo de prensa es de uso difundido en la mayoría de las reparticiones viales, por lo que, su adaptación para la concreción de los ensayos del tipo LCB es de fácil adopción para la mayoría de las mismas. La temperatura ambiente es un factor influyente en estas determinaciones, es recomendable efectuar ensayos con temperaturas del orden de los 20 °C a 25 °C; pudiéndose implementarse el mismo con el embebido o sin el embebido de las muestras.

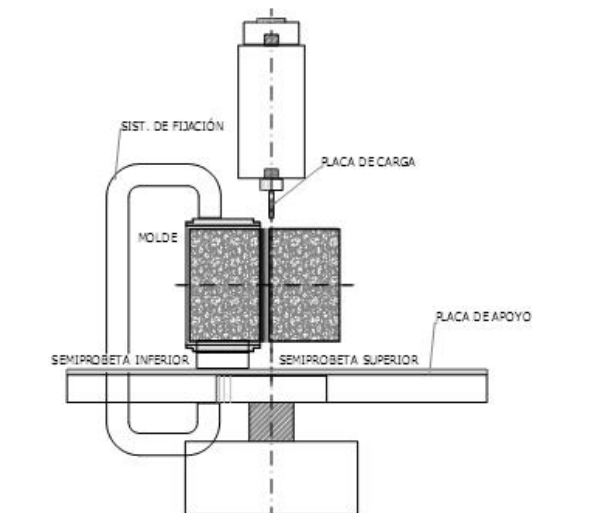


Figura B-1. Esquema de sollicitación del Ensayo Francesio
Fuente: Ricci, 2011

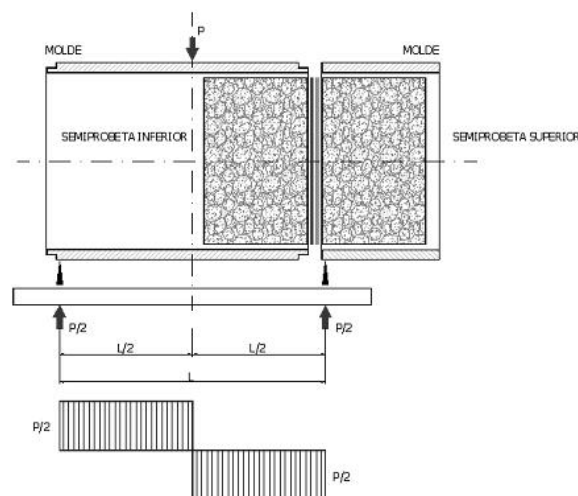


Figura B-2. Esquema del Ensayo de LCB
Fuente: Ricci, 2011

Ensayo de corte sobre testigos, Leutner Test o SBT

Este ensayo fue desarrollado en Suiza como resultado de las investigaciones planteadas por la *International Bitumen Emulsion Federation* (IBEF) en el año 1999. El mismo sigue los lineamientos de la norma SN-671-961 y consta de solicitar a un testigo calado del pavimento al corte simple o directo. Los testigos, cuyo diámetro son de 150 mm, están confeccionados por dos capas, cada una correspondiente a distintos estratos del paquete estructural de un pavimento, en el medio de las cuales se coloca una dotación variable del riego de liga. El ensayo permite establecer la dotación mínima del riego de liga y puede observarse en la Figura B-3.



Figura B-3. Ensayo de corte sobre testigos
Fuente: Montetrusque et al., 2015

Ensayo de torsión sobre testigos

Este otro ensayo ha sido desarrollado en Gran Bretaña y sirve para analizar tanto testigos calados del pavimento como probetas confeccionadas en laboratorio (Nynas, 2007). El diámetro del espécimen debe ser de 100 mm. Consiste en unir una placa metálica a la capa de revestimiento y someterla a un esfuerzo de torsión (Figura B-4). Se registra la carga necesaria para producir la separación de las dos capas en estudio, dicha carga puede ser utilizada para calcular la tensión o esfuerzo de torsión necesario.



Figura B-4. Ensayo de torsión sobre testigos
Fuente: Nynas, 2007

Ensayo de tracción sobre testigos

Otro ensayo surge de investigaciones desarrolladas en Austria (Nynas, 2007). El mismo se efectúa sobre testigos calados del pavimento, a los cuales se adosan placas metálicas en ambos extremos y se los somete a un esfuerzo de tracción (Figura B-5). La normativa que lo regula estipula límites de resistencia mínima que deben ser cumplidos. En el caso de utilizar capas de adherencia de 2 ligantes modificadas con polímeros, la resistencia mínima exigida será de $1,5 \text{ N/mm}^2$. Si la capa de adherencia está constituida por un ligante no modificado, el límite mínimo exigible será de $1,0 \text{ N/mm}^2$. Por cada intervalo de $0,1 \text{ N/mm}^2$ inferior a estos límites se contemplan descuentos al pago de la obra ejecutada.

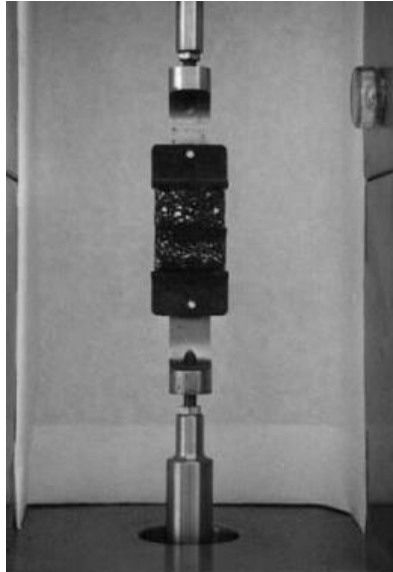


Figura B-5. Ensayo de tracción sobre testigos
Fuente: Ricci, 2011

Ensayo de arrancamiento (*Pull-Off Test Method*)

Este ensayo tiene sus orígenes en el año 1970 en la Universidad de Queens, en Belfast, y es utilizado para determinar la resistencia de adherencia *in situ* mediante un esfuerzo de tracción. La norma ASTM D4541-02 establece que este método de ensayo cubre un procedimiento para evaluar el esfuerzo de adhesión (*pull-off*) de una capa en sustratos rígidos. La prueba permite determinar tanto la fuerza perpendicular máxima (en tracción) que una superficie puede soportar antes de que un tapón de material se separe, como si la superficie se mantiene intacta a una fuerza determinada (Figura B-6). Este ensayo maximiza la tracción en comparación con el esfuerzo cortante aplicado por otros métodos, por lo que los resultados pueden no ser comparables. El método utiliza aparatos portátiles conocidos como probadores de adhesión *pull-off*. Son capaces de aplicar una carga concéntrica, pero se puede determinar la adherencia sólo de un lado del sistema multicapa. Las mediciones están limitadas por la fortaleza de los vínculos de adhesión entre el aparato de carga y la superficie de la muestra o las fuerzas cohesivas del adhesivo.



Figura B-6. *Pull-off Test Method*
Fuente: www.capco.co.uk

Método de cizallamiento (*Wedge Splitting Test*)

Este ensayo consiste en aplicar una fuerza vertical, mediante una cuña entre dos capas adheridas. La fuerza realmente aplicada por la máquina de ensayo se descompone en una componente vertical y una horizontal. Esta segunda componente somete a la probeta a un esfuerzo que intenta despegar las partes componentes de la misma (Brühwiler y Wittmann, 1990), según se observa en la Figura B-7. La superficie realmente sometida al ensayo de adhesión, como así también la componente de fuerza actuante para desunir las partes, son de difícil determinación, lo cual desalienta su utilización.



Figura B-7. *Wedge Splitting Test*
Fuente: www.bft-international.com

Ensayo de cizallamiento oblicuo (*Slant Shear Test*)

Este método de ensayo sirve para determinar la resistencia de la unión entre dos sustratos de algún adhesivo a evaluar. Ha surgido del avance en las investigaciones de refuerzos estructurales. El mismo, consiste en evaluar la adhesión mediante un esfuerzo de corte o cizallamiento inclinado. Las probetas, cilíndricas o prismáticas, son confeccionadas de tal manera que se les genera un corte a través de un plano inclinado 30° con respecto a la vertical, en el cual se aplica el adhesivo a evaluar (Figura B-8). De esa manera, el esfuerzo de compresión aplicado por la máquina de ensayo se descompone, en el plano a evaluar, en un esfuerzo de compresión y un

esfuerzo de corte. Normas como la inglesa BS 6319 o la norteamericana ASTM C882/C882M rigen las condiciones con que debe ser efectuado el ensayo (Radhakrishnan et al., 2012).



Figura B-8. *Slant Shear Test*
Fuente: Radhakrishnan et al., 2012

Método de ensayo de Grzybowska (*Grzybowska Test*)

Este ensayo fue desarrollado en la Politechnika Krakowska y publicado en la Segunda Conferencia Sobre Fisuración Refleja en Pavimentos de la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales, Sistemas y Estructuras de Construcción (RILEM, de su nombre en francés) (Grzybowska, 1993). Las muestras, que originalmente fueran confeccionadas en forma de vigas, son cortadas en forma prismática con dimensiones que oscilan entre los 68 mm y los 80 mm de lado (Figura B-9). Los especímenes son colocados en una máquina de ensayo con su eje desviado 45° de la vertical y se los somete a compresión, generándose un estado tensional similar al mencionado en el *Slant Shear Test*. Algunos autores aseveran que los resultados obtenidos mediante este ensayo están fuertemente influenciados por la variación de temperatura. A 50°C los valores de resistencia de adherencia caen un 60 % en comparación con los obtenidos en ensayos realizados a 20°C (Ricci, 2011).

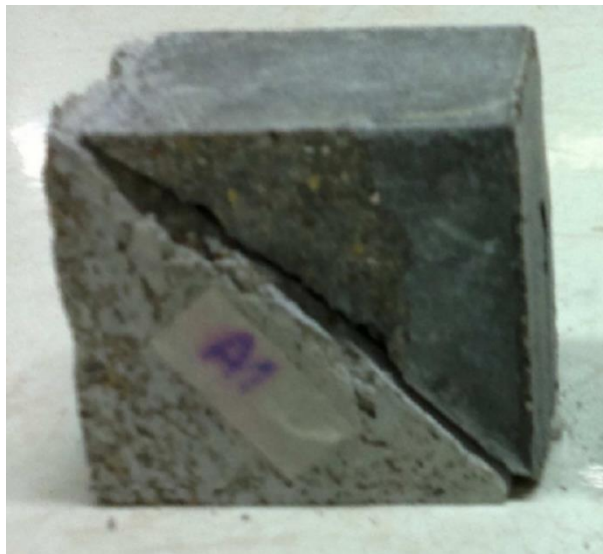


Figura B-9. Probeta ensayada mediante el *Grzybowska Test*
Fuente: www.researchgate.net

Método de repique (*Impact Echo Method*)

El método de repique basa su funcionamiento en la propagación de las ondas a través de los sólidos. El ensayo consiste en aplicar un golpe o impacto a través de un implemento metálico sobre la superficie del pavimento a evaluar y recibir las ondas de propagación a través de un transductor electrónico, según se observa en la Figura B-10. La velocidad de propagación de las ondas, su amplitud y su reflexión se ven fuertemente influenciadas por la presencia de defectos, interfases o huecos presentes en la masa a examinar. Algunos autores han sabido interpretar los resultados de este ensayo aplicado sobre refuerzos de pavimentos, y han detectado en cierta medida aquellas zonas donde la adherencia no se ha visto efectivamente materializada. Con este ensayo no es posible estimar la fuerza de adhesión y su principal ventaja reside en ser un ensayo no destructivo. La interpretación de los resultados obtenidos es compleja, por lo que su difusión como ensayo de control de calidad se ve un tanto desalentada.



Figura B-10. Aplicación del *Impact Echo Method*
Fuente: www.fprimec.com

Ensayo de corte *Superpave* (*Superpave Shear Tester*)

Se basa en el empleo del *Superpave Shear Tester* (SST) que posee dos partes que sostienen a la probeta durante el ensayo. El aparato de corte se monta dentro del SST y la carga de corte se aplica a una tasa constante de 222,5 N/min hasta la falla (Figura B-11). El ensayo se realiza a 25 °C y 55 °C (West et al., 2005).



Figura B-11. Probeta (izq.) y cámara de ensayo (der.) SST
Fuente: West et al., 2005

Ensayo de cizallamiento de Ancona (*Ancona Shear Testing*)

El ensayo forma parte del sistema ASTRA (*Ancona Shear Testing Research and Analysis*). Utiliza un dispositivo de caja de corte directo que permite aplicar tanto una

carga vertical normal como una carga de corte horizontal en la interfase de un espécimen de dos capas. Durante su desarrollo se registran los desplazamientos verticales y horizontales, junto con las cargas que los producen. Se utilizan especímenes cilíndricos con un diámetro nominal de 100 mm, los cuales son colocados dentro de la caja de corte directo, y el conjunto se ubica sobre una mesa móvil (Figura B-12). La carga vertical aplicada corresponde a un esfuerzo de 0,2 MPa, luego de la cual se procede a generar un desplazamiento de la mesa inferior a razón de 2,5 mm/min, el cual genera un esfuerzo de corte en la interfase.

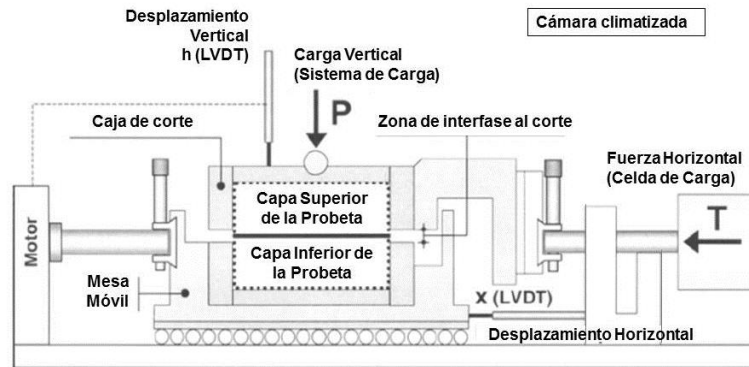


Figura B-12. *Ancona Shear Testing*
Fuente: West et al., 2005 (traducción propia)

Referencias

BRÜHWILER, E., WITTMANN, F.H., "The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests", *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 35, Issues 1–3, Pages 117-125, EEUU, 1990.

FRANCESIO, C.A., "La adherencia entre capas en los pavimentos flexibles", *Memorias de la XVI Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto*, 1969.

GRZYBOWSKA, W., WOJTOWICZ, J., FONFERKO, L., "Application of geosynthetics to overlays in Cracow region of Poland", *Proceedings of the Second International RILEM Conference*, E & F Spon Limited, pp 290-298, Liege, Bélgica, 1993.

MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F., TEORO CARMO, C.A., "Avaliação da adherencia de geogrelhas entre camadas asfálticas", *Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.

NYNAS, "Capas de adherencia", *Performance Nynas Magazine*, edición 1/07, pp 8-9, Reino Unido, 2007.

PÉREZ JIMÉNEZ, F.E., BORRÁS GONZÁLEZ, J.M., RECASENS, R., "Ensayo de corte LCB para la medida de la adherencia entre las capas asfálticas", *XI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, Lima, Perú, 2001.

RADHAKRISHNAN, R., SYAM PRAKASH, V., PRASAD VARMA THAMPAN, C.K., "Performance of Styrene Butadiene Rubber as a Concrete Repair Material in tropical climate", *International Journal of Advancements in Research & Technology (ISSN 2278-7763)*, Volume 1, Issue 6, November, EEUU, 2012.

RAHMAN, A., AI, C., XIN, C., GAO, X., LU, I., “State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure”, *Journal of Adhesion Science and Technology* (ISSN 169-4243), EEUU, 2016.

RICCI, L.A., “Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético”, Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.

WEST, R.C., ZHANG, J., MOORE, J., “Evaluation of bond strength between pavement layers”, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, NCAT Report 05-08, EEUU, 2005.

ANEXO C – RUTINAS MATLAB

Rutina 1

Programa Raiz_2: Ejecuta todos los programas para el caso de una superficie no random para volúmenes de 20 cm^3 a 75 cm^3 con un incremento en 5 cm^3 .

```
1  % programa Raiz_2
2
3  %Vector de los volumenes
4  v = 20:5:75;
5
6  c1 = [0.29 0.41 0.53 0.65 0.78 0.9]; % Valor de h1(ancho del diente)
7  c2 = [0.1 0.24 0.38 0.52 0.66 0.8]; % Valor de h3(alto del diente)
8  pazo = [0.8 1.14 1.48 1.82 2.16 2.5]; % Valor h2 paso del dentado
9  c3 = pazo - c1; %valor del ancho de la ranura
10
11  r_inicial = 50;
12  ra = r_inicial - 49;
13  rb = r_inicial + 20;
14  f = 'funcion_optima';
15  eps = 1e-5;
16  N = 100;
17  show = 1;
18
19  diary('salida_total.txt')
20
21  fileID = fopen('salida_1.txt','w');
22
23
24  for i=1:size(c1,2)
25
26      fprintf(fileID,'%6s\n','-----');
27      fprintf(fileID,'%6s %6s %6s %6s\n','Caso','H1','H2','H3');
28      fprintf(fileID,'%6.2f %6.2f %6.2f %6.2f\n',i,c1(i),pazo(i),c2(i));
29
30      const(1) = c1(i);
31      const(2) = c2(i);
32      const(3) = c3(i);
33
34
35      disp('Caso')
36      disp(i)
37      disp('Valor H1')
38      disp(c1(i))
39      disp('Valor H2')
40      disp(pazo(i))
41      disp('Valor H3')
42      disp(c2(i))
43
44      fprintf(fileID,'%6s %6s %6s %6s %6s\n','Volumen [cm^3]','radio [cm]',' Sup.normal[cm^2]','
Sup.ampliada[cm^2]',' Delta-Sup [cm^2]');
45
46      for j=1:size(v,2)
47
48          const(4) = v(j);
49
50          disp('Valor volumen [cm^3]')
51          disp(v(j))
52
53          disp('Proceso iterativo')
54
55          [punto_medio(j),error_absoluto(j)] = gss(f,ra,rb,eps,N,show,const);
56
57          [V(j) S(j)] = vol_sup(const(1),const(2),const(3),punto_medio(j));
```

```

58
59     delta_sup(j) = S(j)-(pi*punto_medio(j)^2);
60
61     disp('Valor radio [cm]')
62     disp(punto_medio(j))
63     disp('Valor estimado del error absoluto [cm]')
64     disp(error_absoluto(j))
65     disp('Valor volumen [cm^3]')
66     disp(V(j))
67     disp('Valor superficie ampliada [cm^2]')
68     disp(S(j))
69     disp('Valor superficie normal [cm^2]')
70     disp(pi*(punto_medio(j))^2)
71     disp('Delta superficie [cm^2]')
72     disp(delta_sup(j))
73
74     disp('-----')
75
76     fprintf(fileID,'%6.2f%6.3f%6.3f%6.3f\n',V(j),punto_medio(j),pi*(punto_medio(j))^2
,S(j),delta_sup(j));
77
78
79 end
80
81 end
82
83 fclose(fileID);
84 diary off

```

Programa gss: La ejecuta el programa Raiz (55 [punto_medio(j),error_absoluto(j)] = gss(f,ra,rb,eps,N,show,const); el listado esta en el Caso Superficie random

Programa función óptima: Para definir la función a minimizar

```

1 function opti = funcion_optima(r,const)
2 %
3 % calculo del volumen
4 c1 = const(1);
5 c2 = const(2);
6 c3 = const(3);
7 Vdato = const(4);
8
9 Vcalc = volumen(c1,c2,c3,r);
10 % funcion a optimizar
11
12 opti = (Vdato - Vcalc)^2;

```

Programa volumen: Para definir el volumen que contiene una superficie no random en un circulo de radio r

```

1 function V = volumen(c1,c2,c3,r)
2
3 % Calculo de las coordenadas x
4 i = 1;
5 par = 0;
6 impar = 0;
7 x(i) = 0;
8 while x(i) <= r
9     if i == 1
10        x(i+1) = x(i) + c1/2;
11        impar = 1;
12        par = 0;

```

```

13     else
14         if impar == 1;
15             x(i+1) = x(i) + c3;
16             impar = 0;
17             par = 1;
18         else
19             par == 1;
20             x(i+1) = x(i) + c1;
21             impar = 1;
22             par = 0;
23         end
24     end
25     i = i + 1;
26 end
27 x(i) = r;
28
29 % Calculo de las coordenadas y
30 for i=1:size(x,2)
31     if i == 1
32         y(i) = r;
33     else
34         y(i) = sqrt(r^2-x(i)^2);
35     end
36 end
37
38 % Calculo del volumen
39 V = 0;
40 for i = 2:2:size(x,2)-1
41     ancho = x(i+1)-x(i);
42     V_p = c2*ancho*y(i+1) + c2*ancho*(y(i)-y(i+1))/2;
43     V = V + V_p;
44 end
45
46 V = 4*V;

```

Rutina 2

Programa Raiz: Ejecuta todos los programas y simula la cantidad de casos deseados.

```

1  cant_casos = input('Cantidad de casos ');
2
3  Vdato = input('\Volumen dato ');
4
5
6  for s=1:cant_casos
7
8
9      % programa Raiz_1
10     canti_paso = 40;
11     h1 = 0.9;
12     desv_h1 = 0.24;
13     %desv_h1 = 0;
14     h2 = 2.5;
15     h3 = 0.8;
16     desv_h3 = 0.3;
17     %desv_h3 = 0;
18     deltaz = 0.1;
19
20     % intervalo en el que se busca el radio
21     ra = 2.5; % limite inferior
22     rb = 40; % limite superior
23
24
25     lado_cuad = canti_paso * h2;
26
27     if lado_cuad < rb
28         disp('Aumentar cantidad de pasos')

```

```

29     stop
30     end
31
32     % Generacion de la superficie ramdon
33     [punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y] =
genera_super_random(canti_paso,deltaz,h1,desv_h1,h2,h3,desv_h3);
34
35     % Parametros de la funcion a optimizar
36     f = 'funcion_optima';
37     eps = 1e-8;
38     N = 100;
39     show = 1;
40
41
42     const(1,1,1) = Vdato;
43     const(1,1,2) = deltaz;
44     const(1:size(punto_sup_x,1),1:size(punto_sup_x,2),3) = punto_sup_x;
45     const(1:size(punto_sup_y,1),1:size(punto_sup_y,2),4) = punto_sup_y;
46     const(1:size(punto_inf_x,1),1:size(punto_inf_x,2),5) = punto_inf_x;
47     const(1:size(punto_inf_y,1),1:size(punto_inf_y,2),6) = punto_inf_y;
48
49     [punto_medio,error_absoluto] = gss(f,ra,rb,eps,N,show,const);
50
51     clear const
52
53     radio = punto_medio;
54
55     [V,Areas] =
calc_volumen_random(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,radio);
56     [S_normal,S_amiada,Delta_sup] =
calc_superficie_randomv2(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,radio);
57
58
59     disp('#####')
60     disp('Caso')
61     disp(s)
62     disp('Volumen dato')
63     disp(Vdato)
64     disp('Volumen calculado')
65     disp(V)
66     disp('Radio')
67     disp(radio)
68     disp('Superficie normal')
69     disp(S_normal)
70     disp('Superficie ampliada')
71     disp(S_amiada)
72     disp('Delta Superficie')
73     disp(Delta_sup)
74
75     % Borrado de variables
76
77     clear punto_sup_x punto_sup_y punto_inf_x punto_inf_y deltaz radio
78
79     end

```

Programa genera_super_random: Lo ejecuta el programa Raiz, genera la superficie random sobre la que se trabaja. (33 [punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y] = genera_super_random(canti_paso,deltaz,h1,desv_h1,h2,h3,desv_h3);)

```

1     function [punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y] =
genera_super_random(canti_paso,deltaz,h1,desv_h1,h2,h3,desv_h3)
2
3     % generacion del perfil patron
4
5     punto_sup_x(1,1) = 0;
6     punto_sup_y(1,1) = h3;
7     punto_inf_x(1,1) = 0;
8     punto_inf_y(1,1) = 0;

```



```

9
10 punto_sup_x(1,2) = punto_sup_x(1,1) + h1/2;
11 punto_sup_y(1,2) = h3;
12 punto_inf_x(1,2) = punto_inf_x(1,1) + h1/2;
13 punto_inf_y(1,2) = 0;
14
15
16 i = 2; % contador de subindices
17 paso = 1; % contador de paso
18 lado = h1/2;
19 lado_cuad = canti_paso * h2;
20
21 while lado <= lado_cuad
22
23     punto_sup_x(1,i+1) = paso * h2 - (h1/2);
24     punto_sup_y(1,i+1) = h3;
25     punto_inf_x(1,i+1) = paso * h2 - (h1/2);
26     punto_inf_y(1,i+1) = 0;
27
28     punto_sup_x(1,i+2) = paso * h2 + (h1/2);
29     punto_sup_y(1,i+2) = h3;
30     punto_inf_x(1,i+2) = paso * h2 + (h1/2);
31     punto_inf_y(1,i+2) = 0;
32
33     lado = lado + h2;
34
35     i = i + 2;
36     paso = paso + 1;
37
38 end
39
40 % generacion del perfiles random
41
42 % cantidad de secciones transversales random generadas
43 cant_transv = round(lado_cuad/deltaz);
44
45 for j=2:1:cant_transv % cantidad de perfiles randon generados
46
47     punto_sup_x(j,1) = 0;
48     punto_sup_y(j,1) = h3;
49     punto_inf_x(j,1) = 0;
50     punto_inf_y(j,1) = 0;
51
52     % perturbaciones
53     nuevo_h1 = random('Normal',h1,desv_h1);
54     nuevo_h3 = random('Normal',h3,desv_h3);
55
56     punto_sup_x(j,2) = punto_sup_x(j,1) + nuevo_h1/2;
57     punto_sup_y(j,2) = h3;
58     punto_inf_x(j,2) = punto_inf_x(j,1) + nuevo_h1/2;
59     punto_inf_y(j,2) = h3 - nuevo_h3;
60
61
62     i = 2; % contador de subindices
63     paso = 1; % contador de pasos
64     lado = h1/2;
65
66
67     while lado <= canti_paso * h2
68
69         % perturbaciones
70         nuevo_h1 = random('Normal',h1,desv_h1);
71
72         punto_sup_x(j,i+1) = paso * h2 - (nuevo_h1/2);
73         punto_sup_y(j,i+1) = h3;
74         punto_inf_x(j,i+1) = paso * h2 - (nuevo_h1/2);
75         punto_inf_y(j,i+1) = h3 - nuevo_h3;

```

```

76
77     % perturbaciones
78     nuevo_h3 = random('Normal',h3,desv_h3);
79
80     punto_sup_x(j,i+2) = paso * h2 + (nuevo_h1/2);
81     punto_sup_y(j,i+2) = h3;
82     punto_inf_x(j,i+2) = paso * h2 + (nuevo_h1/2);
83     punto_inf_y(j,i+2) = h3 - nuevo_h3;
84
85     lado = lado + h2;
86
87     i = i + 2;
88     paso = paso + 1;
89
90 end
91
92
93 end

```

Programa gss: La ejecuta el programa Raiz (49 [punto_medio,error_absoluto] = gss(f,ra,rb,eps,N,show,const);)

Este programa calcula el mínimo de una función, aplicando la metodología de la Sección Golden.

La función tiene que cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Función tiene una única variable independiente
- b) Es unimodal
- c) Tiene un mínimo en el intervalo de búsqueda definido.

A esta función se le transfieren los siguientes datos:

f = nombre de la función a minimizar

a = extremo izquierdo del intervalo en el que se busca el mínimo

b = extremo derecho del intervalo en el que se busca el mínimo

eps = tolerancia buscada en el cálculo del mínimo

N = número máximo de iteraciones

show = variable para controlar la visualización del proceso iterativo

const = parámetros pasados a la función a minimizar

```

35     % Parametros de la funcion a optimizar
36     f = 'funcion_optima';
37     eps = 1e-8;
38     N = 100;
39     show = 1;
40
41
42     const(1,1,1) = Vdato;
43     const(1,1,2) = deltax;
44     const(1:size(punto_sup_x,1),1:size(punto_sup_x,2),3) = punto_sup_x;
45     const(1:size(punto_sup_y,1),1:size(punto_sup_y,2),4) = punto_sup_y;
46     const(1:size(punto_inf_x,1),1:size(punto_inf_x,2),5) = punto_inf_x;
47     const(1:size(punto_inf_y,1),1:size(punto_inf_y,2),6) = punto_inf_y;

```

Devuelve cuando termina los siguientes datos:

punto_medio = el punto mínimo de la función

error_absoluto = una cota máxima del error absoluto asociada al mínimo calculado

```

1 function [punto_medio,error_absoluto] = gss(f,a,b,eps,N,show,const)
2 %
3 % Metodo de la Seccion Golden para el calculo del minimo de una funcion f.
4 % Se asume: f es continua en [a,b]; y f tiene solamente un minimo en [a,b].
5 % La funcion a lo sumo es evaluada solamente en N veces.
6 % cuando b-a < eps, el proceso iterativo para.
7 %
8 % Variables de entrada:
9 % f = string con el nombre del archivo donde se encuentra la funcion a minimizar.
10 % a = extremo izquierdo del intervalo inicial
11 % b = extremo derecho del intervalo inicial
12 % eps = longitud minima del intervalo final
13 % N = numero maximo de evaluaciones de la funcion

```

```

14 % show = 1 visualizacion de los resultados
15 % const = vector en el que se pasan parametros constantes
16 % en la formula de la funcion
17 %
18 %
19 % Variables de salida:
20 % punto_medio = punto medio del intervalo final, puede ser considerado
21 % como el minimo buscado
22 % error_absoluto = cota del error absoluto del minimo encontrado
23 %
24 % forma de llamar la funcion
25 % [punto_medio,error_absoluto] = gss('myfun',0,1,0.01,20,1,0)
26 %
27
28 c = (-1+sqrt(5))/2;
29 x1 = c*a + (1-c)*b;
30 fx1 = feval(f,x1,const);
31 x2 = (1-c)*a + c*b;
32 fx2 = feval(f,x2,const);
33 if show == 1
34     fprintf('-----\n');
35     fprintf(' a   b   x1   x2   f(x1)   f(x2)   punto medio   b - a\n');
36     fprintf('-----\n');
37     punto_medio = (a+b)/2;
38     fprintf('%4e %4e %4e %4e %4e %4e %6e %6e\n', a,b,x1, x2, fx1, fx2,punto_medio,
b-a);
39 end
40 for i = 1:N-2
41     if fx1 < fx2
42         b = x2;
43         x2 = x1;
44         fx2 = fx1;
45         x1 = c*a + (1-c)*b;
46         fx1 = feval(f,x1,const);
47     else
48         a = x1;
49         x1 = x2;
50         fx1 = fx2;
51         x2 = (1-c)*a + c*b;
52         fx2 = feval(f,x2,const);
53     end;
54     if show ==1
55         punto_medio = (a+b)/2;
56         fprintf('%4e %4e %4e %4e %4e %4e %6e %6e\n', a,b,x1, x2, fx1,
fx2,punto_medio, b-a);
57     end
58     if (abs(b-a) < eps)
59         fprintf('proceso iterativo termino luego de %d pasos\n', i+1);
60         punto_medio = (a+b)/2;
61         error_absoluto = (b-a)/2;
62         return;
63     end;
64 end;
65 fprintf('Se alcanzo el numero maximo de evaluaciones de la funcion %d pasos\n', N);
66 punto_medio = (a+b)/2;
67 error_absoluto = (b-a)/2;

```

Programa Funcion a minimizar: Lo ejecuta la función gss

```

1 function opti = funcion_optima(r,const)
2 %
3 % calculo del volumen
4 Vdato = const(1,1,1);
5 deltaz = const(1,1,2);
6
7 % const(1:size(punto_sup_x,1),1:size(punto_sup_x,2),3) = punto_sup_x;
8 % const(1:size(punto_sup_y,1),1:size(punto_sup_y,2),4) = punto_sup_y;
9 % const(1:size(punto_inf_x,1),1:size(punto_inf_x,2),5) = punto_inf_x;

```

```

10 % const(1:size(punto_inf_y,1),1:size(punto_inf_y,2),6) = punto_inf_y;
11
12
13 punto_sup_x = const(1:size(const,1),1:size(const,2),3);
14 punto_sup_y = const(1:size(const,1),1:size(const,2),4);
15 punto_inf_x = const(1:size(const,1),1:size(const,2),5);
16 punto_inf_y = const(1:size(const,1),1:size(const,2),6);
17
18 % c1 = const(1);
19 % c2 = const(2);
20 % c3 = const(3);
21 % Vdato = const(4);
22
23                                     [Vcalc,Areas]           =
calc_volumen_random(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,r);
24 % Vcalc = volumen(c1,c2,c3,r);
25 % funcion a optimizar
26
27 opti = (Vdato - Vcalc)^2;

```

Programa calc_volumen_random: La ejecuta la funcion a minimizar (23 [Vcalc,Areas] = calc_volumen_random(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,r);) y una vez terminado el proceso de minimización la ejecuta el programa raiz, para obtener el volumen final calculado (55 [V,Areas] = calc_volumen_random(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,radio);)

Calcula el volumen que se genera en la superficie random dentro de un círculo de radio r

```

1 function [V,Areas] =
calc_volumen_random(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,r)
2
3
4 % Calculo del volumen
5
6
7
8 % Calculo de las areas parciales contenidas en cada seccion
9 % Cada seccion es una fila de la matriz Areas
10
11 for i=1:size(punto_sup_x,1)
12
13     proye_r = sqrt(r^2 - ((i-1)*deltaz)^2);
14
15     j = 2;
16     k = 0;
17
18     while punto_inf_x(i,j) < proye_r
19
20
21         if (punto_inf_x(i,j) < proye_r) & (punto_inf_x(i,j+1) < proye_r)
22             % calcula area entera
23             bandera = 1;
24             k = k + 1;
25         end
26
27         if (punto_inf_x(i,j) < proye_r) & (punto_inf_x(i,j+1) > proye_r)
28             % Calcula area parcial
29             bandera = 0;
30             k = k + 1;
31         end
32
33
34         if bandera == 1
35             lado_x = punto_inf_x(i,j+1) - punto_inf_x(i,j);
36             lado_y = punto_sup_y(i,j) - punto_inf_y(i,j);
37             Areas(i,k) = lado_x * lado_y;
38
39         else
40             lado_x = proye_r - punto_inf_x(i,j);

```

```

41         lado_y = punto_sup_y(i,j) - punto_inf_y(i,j);
42         Areas(i,k) = lado_x * lado_y;
43     end
44
45     j = j + 2;
46
47     end
48
49     end
50
51
52 % calculo del volumen de cada hilera y se va acumulando en V
53 % el volumen de cada hilera se calcula usando la regla del trapecio
54
55 V = 0;
56
57 for j=1:size(Areas,2)
58     k = 0;
59
60     for i=1:size(Areas,1)
61         if Areas(i,j) ~= 0
62             k = k + 1;
63         end
64     end
65     % k es el numero de filas distinta de cero en cada columna (hilera)
66
67     % Regla del trapecio de cada hilera
68     if k > 1 % caso que en la hilera se tenga calculado por lo menos 2 areas
69
70         suma = Areas(1,j);
71         suma = suma + 2 * (sum(Areas(2:k-1,j)));
72         suma = suma + Areas(k,j);
73         V_parcial = deltaz * suma/2;
74
75     else % caso que en la hilera se tenga calculado una area unicamente
76         V_parcial = deltaz * Areas(k,j)/2;
77     end
78
79     end
80
81     % acumula los volumenes de cada hilera
82     V = V + V_parcial;
83
84 end
85
86 V = 4 * V;

```

Programa calc_superficie_randomv2: La ejecuta el programa raiz, para obtener la superficie final y el incremento de superficie asociada a la superficie random generado para un radio r (56 [S_normal,S_amiada,Delta_sup] = calc_superficie_randomv2(punto_sup_x,punto_sup_y, punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,radio);)

Para calcular la superficie aplica integración numérica basada la regla del trapecio.

```

1         function [S_normal,S_amiada,Delta_sup] =
2         calc_superficie_randomv2(punto_sup_x,punto_sup_y,punto_inf_x,punto_inf_y,deltaz,r)
3
4     % Calculo de la superficie
5
6     % Calculo de las superficies parciales contenidas entre dos de las seccion
7     S = 0;
8
9
10    % Calculo de las longitudes de cada seccion transversal
11    % Las guardamos en el vector columna Long
12    % Seccion transvarsal j componente Long(1,j)
13
14    for j=1:size(punto_sup_x,1)-1 % avanza en cada seccion transversal

```

```

15
16     if r < (j-1)*deltaz
17         break
18     end
19
20     proye_r = sqrt(r^2 - ((j-1)*deltaz)^2);
21
22     long(1,j) = 0;
23
24     for i=1:size(punto_sup_x,2)-1 % avanza a lo largo de la i-esima seccion transversal
25
26
27
28         if punto_inf_x(j,i) < proye_r
29
30             residuo = rem(i,2);
31
32             if residuo ~= 0
33                 % calculo de la longitud1
34                 distancia1 = abs(punto_sup_x(j,i+1) - punto_sup_x(j,i));
35                 long(1,j) = long(1,j) + distancia1;
36                 bandera = 1; % Indica que en lo proximo vamos a calcular sobre el vano
37
38             else
39                 % calculo de la longitud2 longitud3 y longitud4
40                 %longitud2
41                 distancia2 = abs(punto_sup_y(j,i) - punto_inf_y(j,i));
42                 distancia3 = abs(punto_inf_x(j,i+1) - punto_inf_x(j,i));
43                 distancia4 = abs(punto_sup_y(j,i+1) - punto_inf_y(j,i+1));
44                 long(1,j) = long(1,j) + distancia2 + distancia3 + distancia4;
45                 bandera = 0; % Indica que en lo proximo vamos a calcular sobre el diente
46
47             end
48
49         else
50
51             if bandera == 0
52                 break % Sale de la seccion transversal j para pasar a la siguiente
53
54             else % agrega a la seccion transversal una longitud faltante por cortar en un vano
55                 distancia5 = proye_r - punto_inf_x(j,i-1);
56                 long(1,j) = long(1,j) + distancia5;
57                 break % Sale de la seccion transversal j para pasar a la siguiente
58             end
59
60         end
61
62     end
63
64 end
65
66 % Calculo de la superficie
67 % La superficie se calcula aplicando la regla del trapecio sobre las
68 % longitudes
69     k = size(long,2);
70     suma = long(1,1);
71     suma = suma + 2 * (sum(long(1,2:k-1)));
72     suma = suma + long(1,k);
73     S_parcial = deltaz * suma/2;
74
75
76
77
78     S_normal = pi * r^2;
79     S_amiada = 4 * S_parcial;
80     Delta_sup = S_amiada - S_normal;

```


ANEXO D - LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS PARA RIEGOS DE LIGA

Las emulsiones asfálticas, desde su aparición por el año 1922, han afianzado su uso en riegos en comparación con los asfaltos diluidos. Estos últimos han perdido el mercado por considerarlos contaminantes, debido a la liberación de volátiles de solventes al ambiente. Además, esta situación brinda ventajas de índole técnica, económica, de seguridad en manipulación y ambiental (Ricci, 2011).

El *Asphalt Institute* define a la emulsión asfáltica para uso vial, como la emulsión de un betún asfáltico en agua que contiene pequeñas cantidades de agente emulsificante. Es un sistema heterogéneo que contiene dos fases normalmente inmiscibles (asfalto y agua), en el que el agua forma la fase continua de la emulsión y la fase discontinua está constituida por pequeños glóbulos de asfalto. Los asfaltos emulsificados pueden ser de tipo aniónico o catiónico según el tipo de emulsificante empleado.

En el proceso de fabricación, el betún asfáltico es sometido a intensas tensiones de corte interno mediante un molino coloidal, hasta conseguir que se establezca una dispersión de las microburbujas de asfalto en agua. Estas microburbujas tienen una naturaleza hidrófoba (repulsión al agua) que genera fuerzas de atracción entre sí. Esto hace que se choquen y unan, lo que da lugar al fenómeno de coalescencia, por el cual la emulsión se rompe. Este fenómeno se evita mediante la utilización de productos o agentes emulsificantes (Soengas et al., 2004). En la Figura D-1, se reproducen las distintas instancias que presenta el proceso de rotura de una emulsión asfáltica al entrar en contacto con un árido o una superficie.

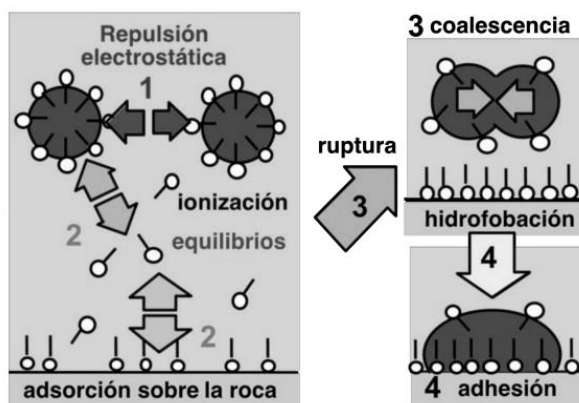


Figura D-1. Etapas de la rotura de una emulsión
Fuente: Mercado et al., 2013

Los componentes de las emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas están compuestas por tres elementos principales: el ligante asfáltico, el agua y el agente emulsificante. Generalmente las emulsiones asfálticas contienen del 40 % al 70 % de asfalto, del 0,1 % al 2,5 % de emulgente, y del 30 % al 60 % de agua, además de algunos otros componentes menores. El agente emulsificante, también llamado emulgente, es gravitante para determinar el tipo de emulsión, y el comportamiento de la misma ante el contacto con los áridos, por lo cual su estudio merece un mayor grado de detalle (Ricci, 2011).

Las emulsiones asfálticas se pueden clasificar de acuerdo al signo de la carga de las gotas de asfalto y de acuerdo con su reactividad. Las emulsiones catiónicas son aquellas en las cuales las gotas se cargan positivamente, y por el contrario, en las emulsiones aniónicas las gotas de asfalto adquieren carga negativa. En función del

emulsificante, existen otras emulsiones (como las no iónicas), pero tienen un uso reducido.

Los emulgentes son agentes tensoactivos (surfactantes), que cuando se disuelven en un medio acuoso, modifican su tensión superficial. Los surfactantes poseen en sus moléculas una parte no polar lipófila (afinidad con los aceites) y otra parte polar hidrófila (afinidad con el agua) (Figura D-2). Las moléculas se concentran en la interfase entre el agua y el asfalto, orientadas con el grupo polar en el agua y las partes no polares de la molécula en el asfalto (Figura D-3). La elección y la concentración de emulsionante en gran parte determinan la carga de la gota de asfalto y la reactividad de la emulsión obtenida.

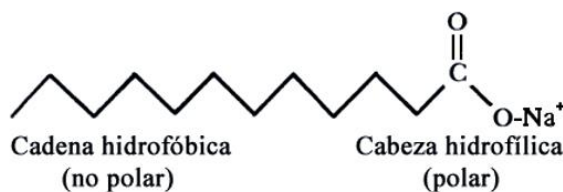


Figura D-2. Molécula de un emulsificante catiónico
Fuente: FARMUPIBI, 2015

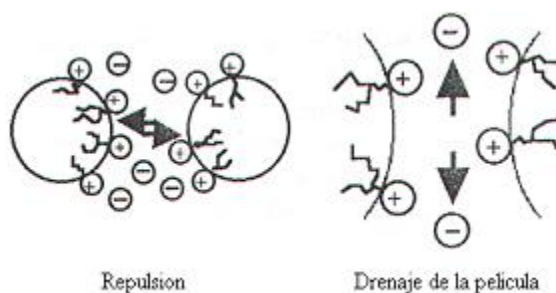


Figura D-3. Mecanismo de estabilización de una emulsión asfáltica
Fuente: Mercado et al., 2013

Si el emulsificante empleado en la elaboración de la emulsión es iónico o aniónico, las gotas de asfalto quedarán todas cargadas con el mismo signo, positivo o negativo respectivamente. Como todas las gotas de asfalto quedarán cargadas con el mismo signo, existirá una repulsión electrostática que contribuye a su separación, mantendrá estable la emulsión e impedirá su rotura.

Los emulsionantes se pueden clasificar en los tipos de tensoactivos aniónicos, catiónicos y no iónicos, en función de la carga que cobran en el agua, aunque esta carga también puede depender del pH. Las emulsiones catiónicas son generalmente ácidas y las emulsiones aniónicas normalmente son alcalinas.

Los emulsificantes aniónicos son tensoactivos que se ionizan en solución acuosa para dar origen a iones orgánicos cargados negativamente. Éstos son los responsables de la actividad superficial. Entre ellos se pueden mencionar: sales alcalinas de ácidos grasos, sales metálicas de ácidos grasos y sales de base orgánica y de ácidos grasos. Las primeras son las de mayor utilización. Algunos emulsificantes aniónicos, que son suministrados en forma neutra insolubles en agua, necesitan ser estabilizados con sodio, amoníaco o hidróxido de potasio. Los emulsionantes catiónicos son tensoactivos que se ionizan en solución acuosa y que originan los iones orgánicos cargados positivamente, responsables de la actividad superficial. Entre los cuales se pueden mencionar: alquilaminas, alquilamidoaminas y heterociclos nitrogenados de tipo imidazolina. Dichas sustancias pueden actuar solas o combinadas y deben estar

presentes en forma de sales. Algunos emulsificantes catiónicos, que son suministrados en forma neutra insolubles en agua, necesitan ser estabilizados con un ácido como el clorhídrico, fosfórico, ascético o sulfúrico antes que su forma catiónica sea generada (Mercado et al., 2008).

El aumento de la concentración de emulsionante disminuye la reactividad de la emulsión. Las emulsiones contienen emulsionantes libres presentes en solución en la fase acuosa. La cantidad del emulsionante libre es un factor muy importante en el proceso de rotura, esencialmente al variar su velocidad, en función de su interacción con los áridos. El emulsionante libre es adsorbido más rápidamente por la superficie del agregado que el emulsionante de las partículas de asfalto, lo cual retarda la aproximación de la gota de asfalto a la superficie pétreo. Este fenómeno es mayor a mayor concentración de emulsionante.

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

- Cloruro de Calcio y Cloruro de Sodio: se incluyen en la emulsión en el 0,1 % al 0,2 % para reducir la ósmosis de agua en el asfalto y reducir al mínimo los cambios en la viscosidad. El Cloruro de Sodio se utiliza en emulsiones aniónicas.
- Solventes: pueden ser incluidos en la emulsión para mejorar la emulsificación, reducir el asentamiento, mejorar la tasa de endurecimiento a bajas temperaturas, o proporcionar la viscosidad de la carpeta después del curado. Las emulsiones pueden contener hasta un 15 % de solvente para proporcionar las características de trabajabilidad y estabilidad al almacenamiento durante la vida de las mezclas asfálticas.
- Látex: la modificación con polímeros puede mejorar las propiedades del asfalto en cuanto a la cohesión, la resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas y la resistencia a fluir a altas temperaturas. El látex es una dispersión acuosa de polímero que se adapta particularmente a la modificación de las emulsiones. Los látex pueden ser aniónicos, no iónicos y catiónicos, y es importante que el tipo de látex sea compatible con la emulsión. El EVA (etil vinil acetato), el látex SBR (de la sigla en inglés del estireno butadieno caucho), el policloropreno y el látex de caucho natural son los comúnmente utilizados en la pavimentación.

Clasificación de las emulsiones por la velocidad de rotura

El asfalto emulsionado deberá volver a su estado de película de asfalto continua con el fin de actuar como ligante de los agregados pétreos que eventualmente pueda recubrir, o de las capas del pavimento si se la emplea como riego de adherencia. En la rotura ocurren los procesos de floculación, coalescencia y eliminación del agua. En el caso de las emulsiones de rotura muy lenta, la evaporación y la absorción del agua por parte de los agregados puede ser el principal desencadenante del proceso de rotura. Sin embargo, en la mayoría de los casos las reacciones químicas entre el agregado y la emulsión generan la fijación de esta última, por ello no es necesario que toda el agua se evapore antes de que la rotura se lleve a cabo. Las fuerzas electroquímicas que se originan en la reacción de la emulsión con los áridos suelen ser suficientes para eliminar el agua del sistema.

La velocidad de estos procesos de colocación y rotura dependen de la reactividad de la emulsión, la reactividad de los agregados y de los factores ambientales, como temperatura, humedad y velocidad del viento. Generalmente los asfaltos menos viscosos tienden a tener roturas más rápidas. Para tener un orden de magnitud, las

roturas se pueden dar en pocas horas en el caso de tratamientos superficiales, o varias semanas en el caso de una mezcla densa en frío.

Distintas investigaciones sobre los procesos de rotura han demostrado que los factores más importantes son los cambios en el pH causados por la reacción de los áridos con los ácidos en la emulsión, la adsorción de emulsionante libre sobre la superficie total y la floculación de las gotas de emulsión con los finos. La escala de tiempo relativa de floculación y coalescencia (rotura) depende del sistema, pero en general la floculación es el proceso que se genera más rápido y en el cual se elimina un poco de agua del sistema y se desarrolla algo de fuerza cohesiva; luego le sigue un lento proceso de fusión que da como resultado una fase o película continua de asfalto. Esta fase de asfalto debe adherir a los agregados. La coalescencia es un proceso de inversión de fases, la emulsión asfalto-agua se transforma en una de tipo agua-asfalto, que lentamente pierde su fase acuosa interna. Este proceso de inversión se ve favorecido cuando la relación de asfalto en agua en el sistema aumenta (Ricci, 2011).

Los agregados suelen asumir una carga eléctrica en superficie cuando están en contacto con el agua, lo que depende de la naturaleza de los minerales, el pH y la presencia de sales solubles. Los agregados con alto contenido de sílice tienden a adoptar carga negativa. Por otro lado, los agregados básicos, como la piedra caliza, pueden adoptar carga positiva. Algunos agregados, como el *filler* cal o el cemento, por su carácter alcalino, pueden neutralizar el ácido en las emulsiones catiónicas causando el aumento del pH y la desestabilización de la emulsión.

Actualmente las emulsiones se pueden clasificar por su velocidad de rotura en:

- Emulsiones Aniónicas: Rotura Rápida, Rotura Media, Rotura Lenta
- Emulsiones Catiónicas: Rotura Rápida, Rotura Media, Rotura Lenta, Superestable

La Norma IRAM 6691 también contempla las siguientes clasificaciones:

- Imprimación
- Rotura Controlada
- Reciclado en Frío

En la Tabla D-1, se observa una clasificación de las emulsiones y los emulsificantes empleados en cada caso.

Tabla D-1. Clasificación de emulsiones y tipos de emulsificantes
Fuente: Ricci, 2011

Adición de porcentajes típicos de emulsificante			
Tipo de Emulsión	Emulsificante %	pH de la emulsión	Tipo de emulsificante
Catiónica de rotura rápida	0.15-0.25	2.0-4.0	Grasa diamina
Catiónica de rotura media	0.30-0.60	1.5-4.0	Grasa diamina
Catiónica de rotura lenta	0.80-2.00	2.0-5.0	Amina cuaternaria
Aniónica de rotura rápida	0.20-0.40	10.5-12.0	Resina ácida
Aniónica de rotura media	0.40-0.80	10.5-12.0	Resina ácida
Aniónica de rotura media	1.20-2.50	7.50-12.0	Lignosulfonato no-iónico

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

Dichos mecanismos se producen en forma simultánea, pero en emulsiones aniónicas prevalece la rotura por evaporación, mientras que en emulsiones catiónicas la rotura es promovida en mayor medida por la reacción fisicoquímica (Ricci, 2011).

Caracterización de las emulsiones asfálticas

La Norma "IRAM 6691 Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas convencionales" (IRAM, 2008), en su "Tabla B.1. Diferentes usos de las emulsiones catiónicas convencionales en construcciones viales" (Tabla D-2), presenta una recomendación del tipo de emulsión a emplear según el uso que se le dará en obra. En la Tabla D-3 y la Tabla D-4, se observa también lo que establece dicha norma como requisitos para cada tipología de emulsión asfáltica.

Tabla D-2. Usos viales de las emulsiones asfálticas catiónicas

Fuente: IRAM, 2008

A = Aconsejable; P = Posible

Aplicación	Rotura Rápida			Rotura Media		Rotura Lenta	Rotura Superestable
	CRR-0	CRR-1	CRR-2	CRM-1	CRM-2	CRL	CRS
Riegos de liga, de curado en negro	A	P					
Tratamientos Superficiales	P	A	A	P			
Mezclas en frío abiertas				A	A		
Mezclas en frío almacenables para bacheos				P	A		
Mezclas densas en frío						P	A
Riegos antipolvo						P	A
Estabilizaciones de suelos. Grava emulsión						P	A
Lechadas asfálticas convencionales						A	A

Tabla D-3. Requisitos de las emulsiones asfálticas

Fuente: IRAM, 2008

Características	Unidad	Requisitos de las Emulsiones																Método de ensayo				
		Rotura rápida						Rotura media				Rotura lenta		Superestable	Imprimación		Rotura controlada		Reciclado en frío			
		CRR-0		CRR-1		CRR-2		CRM-1		CRM-2		CRL		CRS	CI		CRC		CRF			
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.		Min.	Máx.	Min.	Máx.
Viscosidad Saybolt Furol a	25°C	-	50	-	50	-	-	20	-	-	-	-	50	-	50	-	50	-	50	-	35	IRAM 8721
	50°C	-	-	-	-	20	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Residuo asfáltico por destilación (*)	g/100g	57	-	62	-	65	-	60	-	60	-	60	-	60	-	40	-	60	-	60	-	IRAM 8719
Hidrocarburos destilables	ml/100ml	-	3	-	3	-	3	-	-	-	12	-	-	-	-	5	15	-	-	-	-	IRAM 8719
Contenido de agua	g/100g	-	43	-	38	-	35	-	40	-	40	-	40	-	40	-	55	-	40	-	40	IRAM 8719
Asentamiento	g/100g	-	5	-	5	-	5	-	5	-	12	-	5	-	5	-	15	-	5	-	10	IRAM 8716
Residuo sobre tamiz IRAM 850 µm	g/100g	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	IRAM 8717 y 5.1
Recubrimiento y resistencia al agua (**)	-	80	-	80	-	80	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	IRAM 6679
Mezcla con cemento	g/100g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-	-	-	2	-	2	IRAM 8718
Mezcla con arena silicea y agua (**)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.3
Mezcla de lechada asfáltica para clima cálido (**)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.3
Carga de partículas	-	Positiva																			IRAM 6690	

Tabla D-4. Requisitos del residuo de destilación
Fuente: IRAM, 2008

Características	Unidad	Requisitos del Residuo asfáltico																		Método de ensayo		
		Rotura rápida						Rotura media				Rotura lenta		Superestable		Imprimación		Rotura controlada			Reciclado en frío	
		CRR-0		CRR-1		CRR-2		CRM-1		CRM-2		CRL		CRS		CI		CRC			CRF	
Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.			
Penetración del residuo (*)	0,1 mm	50	200	50	200	50	200	50	200	70	300	50	200	50	200	200	300	50	200	50	200	IRAM 6576
Ductilidad	cm	80	-	80	-	80	-	80	-	50	-	80	-	80	-	40	-	80	-	80	-	IRAM 6579
Solubilidad en 1,1,1-tricloroetano o tricloroetileno	g/100 g	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	95	-	IRAM 6585 y 5.2
Ensayo de Olieisla	-	Negativo																			IRAM 6594	

(*) Las emulsiones convencionales con valores de penetración menores que los establecidos, se designan añadiendo la letra d. Por las condiciones particulares de la obra, se pueden establecer otros valores de penetración en el residuo de las emulsiones.

Viscosidad Saybolt Furol a 50 °C

La Norma “IRAM 6721 Método para la determinación de la viscosidad Saybolt Furol” (IRAM, 1989b), describe el procedimiento de ensayo que consiste en medir el tiempo de flujo de un volumen dado de emulsión a través de un orificio de diámetro normalizado y a una temperatura establecida, que representa una condición de trabajo común (Figura D-4). La necesidad de la medida de la viscosidad está ligada al manejo de una emulsión tanto en acopio, bombeo, carga y descarga, como en obra. Las viscosidades dependen de varios factores, uno de los más importantes es la concentración de asfalto, o residuo de la emulsión; además influyen, la concentración de emulsificante, la distribución del tamaño de partículas, el tipo de cemento asfáltico, la presencia o no de fluxantes (estos pueden ser gasoil, kerosene, etc.) u otras sustancias, como gas mineral o espesantes orgánicos.

Como se observara en la Tabla D-3 las emulsiones catiónicas tienen un rango especificado de viscosidades de hasta 50 segundos Saybolt Furol a 25 °C, excepto la emulsión rápida CRR-2 de alto residuo (mínimo 65 %) y la media CRM-2, para la cual se especifica un mínimo de 20 segundos Saybolt Furol a 50 °C.



Figura D-4. Viscosímetro Saybolt Furol
Fuente: www.joinville.udesc.br

Residuo asfáltico por destilación

El ensayo, que es regido por la Norma “IRAM 6719 Método de determinación por destilación del residuo asfáltico y de los hidrocarburos destilables” (IRAM, 1988), consta de una destilación simple que permite recoger y medir el agua y los hidrocarburos destilables hasta 260 °C, temperatura máxima de ensayo (Figura D-5). El residuo de destilación es, por tanto, el cemento asfáltico base, el cual puede ser sometido a ensayos de caracterización. Esta es la única técnica normalizada en el país para la recuperación del asfalto base. El residuo de destilación se calcula por medio de la Ecuación D-1.

$$R = \frac{(m_2 + 1,5 - m_1) \cdot 100}{m} \quad (D-1)$$

Donde:

- R = residuo asfáltico [g/100 g]
- m_2 = masa del alambique, sus accesorios y el residuo [g]
- 1,5 = dif. de masa en las pesadas del alambique en frío y caliente [g]
- m_1 = masa del alambique y sus accesorios [g]
- m = masa de la emulsión [g]

A su vez, este ensayo permite determinar los hidrocarburos destilables, mediante el empleo de la Ecuación D-2.

$$H = \frac{V \cdot \rho}{m} \cdot 100 \quad (D-2)$$

Donde:

- H = hidrocarburos destilados [ml/100 ml de emulsión asfáltica]
- V = volumen de hidrocarburos destilados en la probeta [ml]
- ρ = densidad de la emulsión asfáltica a temperatura ambiente [g/ml]
- m = masa de la emulsión [g]

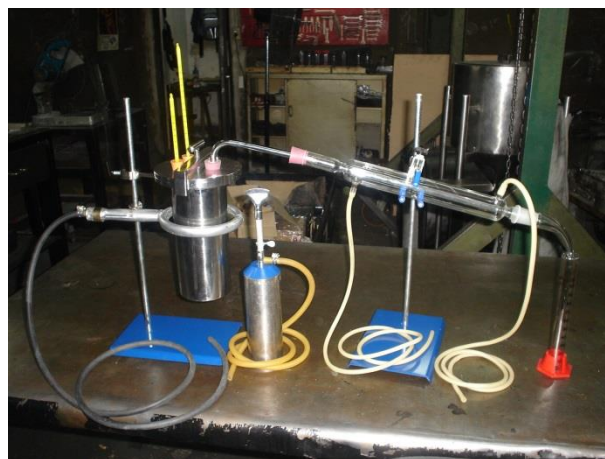


Figura D-5. Destilación de emulsión asfáltica
Fuente: www.e-asphalt.com

Asentamiento

La Norma "IRAM 6716 Método de ensayo de asentamiento" (IRAM, 1989a) define al asentamiento como la diferencia entre el contenido de asfalto de la fracción del fondo y de la superior de la emulsión, producida luego de un reposo de 5 días. El ensayo se realiza por duplicado. Para la realización del mismo se toman 500 cm³ del material pasante por el Tamiz IRAM 850 μm (Tamiz N° 20), se colocan en un tubo de ensayo especial y se dejan reposar a temperatura ambiente durante 5 días. Transcurrido el período de reposo, se toman 55 cm³ de la parte superior en un vaso de precipitado. A este material, convenientemente homogeneizado, se le determina el residuo asfáltico, según IRAM 6715. De la parte inferior se drenan 390 cm³ y se desechan. Se toma el material remanente en el tubo y se procede, como se mencionó anteriormente, a determinar el residuo, según IRAM 6715. Se calcula el asentamiento con la fórmula de la Ecuación D-3.

$$A = B - C \quad (D-3)$$

Donde:

- A = asentamiento a los 5 días [g/100 g]
- B = residuo de la parte superior [g/100 g]
- C = residuo de la parte inferior [g/100 g]

Si A es mayor que cero, se trata de un caso de concentración en la parte inferior. Si A es menor que cero, se trata de una concentración de residuo en la parte superior. Se establece un máximo de 5 % para dicha diferencia en el caso de las emulsiones de rotura rápida, lenta, superestable y en el caso de las media, la de nomenclatura CRM-1. Para el caso de la media, CRM-2 el máximo es de 12 % y en la de Imprimación 15 %. Este ensayo refleja la estabilidad de la emulsión en el almacenaje. Las variables que influyen son, fundamentalmente, la calidad de la emulsificación, la temperatura ambiente y la diferencia de densidades entre la fase dispersa (asfalto) y la dispersante (solución acuosa).

Determinación del residuo asfáltico por determinación de agua

Lo aborda la Norma "IRAM 6715 Determinación del residuo asfáltico por determinación de agua" (IRAM, 1986). Consiste en una destilación en presencia de Xileno, recogiendo el agua y el solvente en una trampa graduada y determinándose el contenido de asfalto en forma indirecta (Figura D-6). El ensayo se basa en las expresiones de la Ecuación D-4 y Ecuación D-5.

$$A = \frac{V \cdot \rho}{m} \cdot 100 \quad (D-4)$$

Donde:

- A = contenido de agua [g/100 g]
- V = volumen de agua contenido en la trampa [cm³]
- ρ = densidad del agua [g/cm³]
- m = masa de la muestra [g]

$$R = 100 - A \quad (D-5)$$

Donde:

- R = residuo asfáltico [g/100 g]
- A = contenido de agua según Ecuación C-4 [g/100 g]



Figura D-6. Sistema de destilación
Fuente: www.ub.edu

Residuo sobre tamiz IRAM 850 μm

La Norma “IRAM 6717 Residuo sobre tamiz IRAM 850 μm ” (IRAM, 1991) define uno de los primeros ensayos que se lleva a cabo sobre la emulsión, puesto que los restantes se efectúan sobre la muestra tamizada. Tomada una muestra de 1000 g, se la acondiciona a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se hace pasar a través del tamiz IRAM 850 μm (Tamiz N° 20). Luego, se lava el envase que la contenía y el residuo sobre el tamiz, hasta que la solución de lavado sea limpia. Para el caso de emulsiones catiónicas, como la empleada, la solución puede ser solamente agua. El tamiz con el residuo es llevado a estufa hasta peso constante y se determina su peso con el cual posteriormente se calcula el residuo con la Ecuación D-6.

$$R = \frac{(A - B)}{m} \cdot 100 \quad (\text{D-6})$$

Donde:

- R = residuo sobre tamiz [g/100 g]
- A = masa total del tamiz con el residuo [g]
- B = masa del tamiz [g]
- m = masa de la muestra de emulsión [g]

El límite establecido para este ensayo, independiente del tipo de emulsión, es el máximo de 0,1 g/100 g. Un exceso de gotas de asfalto de gran tamaño podría causar taponamientos de filtros o picos regadores y conspirar con un recubrimiento fino y uniforme de la superficie de los agregados pétreos.

Penetración del residuo

La Norma “IRAM 6576 Determinación de la penetración utilizando un penetrómetro de aguja” (IRAM, 2004) establece el procedimiento para determinar una medida de la consistencia de los asfaltos. La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetros, que penetra verticalmente en el material una aguja

normalizada en condiciones de carga, tiempo y temperatura (Figura D-7). Normalmente el ensayo se realiza a 25 °C, durante 5 segundos y una carga móvil total (incluida la aguja) de 100 gramos.



Figura D-7. Penetración de asfalto
Fuente: www.pavementinteractive.org

Ductilidad

La Norma “IRAM 6579 Determinación de la ductilidad” (IRAM, 2005) establece el procedimiento para efectuar el ensayo, que consiste en someter una probeta del material bituminoso, con forma de hueso de perro, a un esfuerzo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad (Figura D-8). La ductilidad es definida como el alargamiento máximo, expresado en centímetros, que experimenta un asfalto al ser traccionado. Si no se hubiese producido la rotura al llegar al límite de desplazamiento del aparato, se informa el resultado indicando que la ductilidad es mayor que 110 cm. El ensayo normalmente se realiza a una velocidad de 50 milímetros por minuto y a una temperatura de 25°C.



Figura D-8. Ensayo de ductilidad
Fuente: www.repsol.com

Oliensis

La Norma "IRAM 6594 Oliensis, Ensayo de la mancha" (IRAM, 2004) establece este ensayo, que pretende determinar la homogeneidad o no de los asfaltos materia de análisis. Esencialmente consiste en mezclar el asfalto con un disolvente, originalmente nafta y actualmente una mezcla de heptano/xileno, y determinar la forma de la mancha de una gota de asfalto en este solvente en un papel de filtro (Figura D-9).



Figura D-9. Ensayo de Oliensis
Fuente: elaboración propia

Referencias

FARMUPIBI, "Los tensoactivos y su comportamiento en la interfase sólido-líquido", Prácticas de Laboratorio de Ingeniería Farmacéutica, Méjico, 2015. [Consultado web marzo de 2017: farmupibi.blogspot.com.ar/2015/03/los-tensoactivos-y-su-comportamiento-en.html].

IRAM, "IRAM 6576 Determinación de la penetración utilizando un penetrómetro de aguja", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2004.

IRAM, "IRAM 6579 Determinación de la ductilidad", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2005.

IRAM, "IRAM 6594 Oliensis. Ensayo de la mancha", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2004.

IRAM, "IRAM 6691 Asfaltos. Emulsiones asfálticas catiónicas convencionales", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 2008.

IRAM, "IRAM 6715 Determinación del residuo asfáltico por determinación de agua", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1986.

IRAM, "IRAM 6716 Método de ensayo de asentamiento", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1989.

IRAM, "IRAM 6717 Residuo sobre tamiz IRAM 850 μm ", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1991.

IRAM, "IRAM 6719 Método de determinación por destilación del residuo asfáltico y de los hidrocarburos destilables", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1988.

IRAM, "IRAM 6721 Método para la determinación de la viscosidad Saybolt Furol", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Argentina, 1989.

MERCADO, R., AVENDAÑO, J., CELIS, M.T., SALAGER, J.L., "Ruptura de emulsiones asfálticas catiónicas y no iónicas mediante la adición de arena", Revista Ciencia e Ingeniería de la Universidad de los Andes (ISSN 1316-7081), vol. 34, n. 2, pp. 111-122, abril-julio, Venezuela, 2013.

MERCADO, R., BRACHO, C., AVENDAÑO, J., "Emulsiones asfálticas, usos y rompimiento", Universidad de los Andes, Cuaderno FIRP S 365-A, Venezuela, 2008.

RICCI, L.A., "Evaluación de adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético", Tesis de Maestría en Ingeniería en Transporte – Orientación Vial, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 2011.

SOENGAS, C., GONZÁLEZ, R., BACHETTA, G., RIVERA, J., "Las emulsiones asfálticas en procesos de impermeabilización", Memorias de la XXXIII Reunión del Asfalto en Mendoza, Comisión Permanente del Asfalto, Argentina, 2004.