



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1473-2022

Informe final fase I proyecto: UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del
desempeño de mezclas con materiales de desecho

Preparado por:

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte

San José, Costa Rica

Diciembre, 2023

Código Postal 11501-2060, Universidad de Costa Rica | Tel: (506) 2511-2500

direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr



1. Informe INF-1473-2022	2. Copia No 1
3. Título y subtítulo: INFORME FINAL FASE I PROYECTO: UIIT-2020-01 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS CON MATERIALES DE DESECHO	4. Fecha del Informe Diciembre 2023
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440	
6. Notas complementarias	
7. Resumen <p><i>El presente informe muestra los resultados obtenidos de la construcción y evaluación del desempeño de dos mezclas modificadas con material de desecho, específicamente Tereftalato de polietileno (PET por sus siglas en Inglés), material muy utilizado en envases de bebidas y el polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés) con múltiples usos en la industria moderna, desde tuberías hasta recipientes de en productos de limpieza, entre otros plásticos de desecho de la industria moderna.</i></p> <p><i>Para evaluar su comportamiento y desempeño dentro de la mezcla asfáltica se construyeron 6 secciones de prueba a escala real en las instalaciones del LanammeUCR (2 de control, 2 con PET y 2 con PEAD), utilizando métodos de diseño, fabricación y construcción acorde a la normativa y prácticas nacionales. Los tramos mencionados fueron ensayos de forma acelerada utilizando el simulador de vehículos pesados, HVS por sus siglas en inglés, modelo MARK VI de la casa matriz Dynatest. Según el esquema de cargas y protocolo de ensayos planteado en la fase I se aplicaron sobre cada tramo un total de 3,2 millones de ejes equivalentes de carga (ESAL's) en 10 semanas (2,5 meses), aplicando en promedio 20 000 aplicaciones de carga bidireccional cada 24 horas, sobre cada sección de prueba.</i></p> <p><i>La evaluación de los tramos fue realizada mediante una valoración estructural al inicio y final del ensayo en cada tramo, mediante el deflectómetro de impacto (FWD), perfilómetro laser y fricción con el péndulo inglés. Adicionalmente, se hace un seguimiento de forma visual y registro fotográfico, seguimiento del ahuellamiento e IRI mediante el uso del perfilómetro laser del HVS y seguimiento de deflexiones mediante el deflectómetro de superficie (RSD por sus siglas en inglés).</i></p> <p><i>Completada la primera fase de evaluación se evidenció una tasa de deterioro muy baja en todos los tramos evaluados. La media de ahuellamiento promedio estuvo muy lejana al umbral definido de 12,5 mm para los tramos sin acondicionar y de 16,5 mm para los tramos acondicionados. Esto es un indicador de un buen desempeño a la deformación permanente, que también pudo observarse en los ensayos de desempeño como APA o rueda de Hamburgo</i></p> <p><i>Respecto al daño ejercido a la estructura se detectaron diferencias en las pérdidas de rigidez de las capas de mezclas asfáltica, sin que esto repercutiera en un desempeño diferenciado entre secciones analizadas. Por este motivo se propuso una segunda fase de ensayo que permita analizar de una mejor forma la tendencia del daño. Respecto a la resistencia al deslizamiento, se puede inferir que no existe la suficiente evidencia estadística para evidenciar que el modificante afecte negativamente esta variable bajo el esquema de carga empleado.</i></p> <p><i>Como conclusión principal de esta primera fase de ensayo se tiene que después de 3,2 millones de ESAL aplicados no se detectaron diferencias negativas de modificar la mezcla con un porcentaje del 1%, en comparación con la mezcla de control, sin embargo, deberá esperarse a los resultados de la segunda fase carga para validar si estas conclusiones aplican a mayores niveles de carga.</i></p>	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 2 de 368
-----------------------------------	----------------	-----------------



8. Palabras clave HVS, Ensayo acelerado de pavimentos, Pavimentos, Desempeño, Materiales Reciclados, PET, PEAD	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 368
11. Preparado por:		
Ing. Eliécer Arias Barrantes, M.Sc. Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte		
31/01/2024		
12. Revisado por:		13. Aprobado por:
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA. Coordinador Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte		Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc. Coordinador General PITRA
31/01/2024		31/01/2024



TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	15
1.1	Antecedentes	15
1.2	Experiencias internacionales.....	16
1.2.1	Dosificaciones y tamaños típicos utilizados de material reciclado.....	18
1.2.2	Modo de incorporación en planta.....	18
1.2.3	Detalles constructivos y de diseño.....	19
1.3	Contexto nacional.....	20
2	Objetivos y Alcance.....	20
2.1	Objetivo geeneral.....	20
2.2	Objetivos específicos.....	21
2.3	Alcance.....	21
3	Esquema Experimental	22
3.1	Ubicación y distribución de los tramos	23
3.2	Descripción de los ensayos y mediciones a realizar	25
3.2.1	Ensayo a Escala con el Simulador de Vehículos Pesados.....	25
3.2.2	Esquema de carga.....	27
3.3	Mediciones realizadas durante el ensayo acelerado.....	28
3.4	Acondicionamiento para tramos de estudio.....	33
4	Estructura de Pavimentos y Caracterización de Materiales.....	35
4.1	Diseño preliminar y respuestas mecánicas esperadas	35
4.2	Caracterización de materiales granulares	37
4.3	Diseño original de la mezcla asfáltica.....	46
4.3.1	Granulometría y gravedad específica de los agregados	46
4.3.2	Granulometría de la combinación de agregados.....	49
4.3.3	Propiedades volumétricas Marshall.....	50
4.4	Verificación del diseño de mezcla	51

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 4 de 368
-----------------------------------	----------------	-----------------



4.4.1	Granulometría y gravedad específica de los agregados	52
4.4.2	Granulometría de la combinación de agregados para diseño	56
4.4.3	Propiedades volumétricas Marshall réplica del diseño	58
4.4.4	Propiedades volumétricas Marshall mezcla remoldeada de probetas extraídas de los tramos de control	61
5	Producción de Mezcla y Construcción de los Tramos	63
5.1	Mezcla asfáltica modificada con plástico reciclado	63
5.1.1	Dosificaciones de los materiales de desecho	63
5.1.2	Proceso de dosificación en la planta de producción de mezcla asfáltica	63
5.2	Construcción de los tramos experimentales	73
5.2.1	Proceso constructivo	73
5.2.2	Densidades de compactación	86
6	Resultados	87
6.1	Descripción inicial general de los tramos	87
6.2	Parámetros estructurales de los tramos de estudio	92
6.3	Mezcla asfáltica de control, sin material de desecho	103
6.3.1	Tramo de control sin acondicionamiento	103
6.3.2	Tramo de control con acondicionamiento por temperatura	112
6.4	Mezcla asfáltica con 1,0% de PET	120
6.4.1	Mezcla sin acondicionamiento	120
6.4.2	Mezcla con acondicionamiento por temperatura	129
6.5	Mezcla asfáltica con 1.0% de PEAD y otros plásticos	137
6.5.1	Mezcla sin acondicionamiento	137
6.5.2	Mezcla con acondicionamiento por temperatura	146
6.6	Retrocálculo de módulos	154
6.7	Desempeño de las mezclas	156
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	158
7.1	Deflectometría	158



7.1.1	Comparaciones entre mediciones de deflectometría FWD y RSD	158
7.1.2	Módulos retrocalculados	160
7.2	Deformación Permanente.....	163
7.3	Índice de rugosidad internacional (IRI).....	165
7.4	Resistencia al deslizamiento	167
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	170
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
10	ANEXOS.....	178
	Anexo 1: Esquema de ensayo, sin acondicionamiento	178
	Anexo 2: Esquema de ensayo, con acondicionamiento	182
	Anexo 3: Protocolo recolección de material.....	187
	Anexo 4: Diseño MAC original	196
	Anexo 5: Material de Base.....	202
	Anexo 6: Retrocálculo de módulos	204
	Anexo 7: FWD vs RSD	237
	Anexo 8: Análisis de módulos retrocalculados	286
	Anexo 9: Resultados ahuellamiento, regularidad y fricción	303
	Anexo 10: Resultados de desempeño a la mezcla asfáltica.....	353



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL EDIFICIO C DE LANAMMEUCR; MONTES DE OCA, SAN JOSÉ, COSTA RICA (9.9358591°N, -84.0446636°O). FUENTE: GOOGLE EARTH, 2020.	23
FIGURA 2. VISTA EN PLANTA DEL ESPACIO DONDE SE ENCUENTRAN LOCALIZADOS LOS TRAMOS (COTAS EN METROS) Y UBICACIÓN DE TRAMOS.	25
FIGURA 3. SIMULADOR DE VEHÍCULOS PESADOS, HVS MARK VI DE DYNATEST.	26
FIGURA 4. PERFILÓMETRO LÁSER.	28
FIGURA 5. EJEMPLO DE MATRIZ DE DATOS DE DEFORMACIÓN.	29
FIGURA 6. ENSAYOS DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO.	30
FIGURA 7. DEFLECTÓMETRO DE SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.	31
FIGURA 8. EJEMPLO DE DEFLEXIÓN MEDIDA Y DEFLEXIÓN MODELADA.	32
FIGURA 9. EJEMPLO DE MONITOREO Y DEMARCACIÓN DE AGRIETAMIENTO EN TRAMO DE PRUEBA.	33
FIGURA 10. CÁMARA CLIMÁTICA PARA CONDICIONAMIENTO TÉRMICO.	34
FIGURA 11. ESTRUCTURA DE LOS TRAMOS EXPERIMENTALES.	35
FIGURA 12. CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL DE BASE GRANULAR.	39
FIGURA 13. CURVA DENSIDAD SECA MÁXIMA VS HUMEDAD ÓPTIMA PARA EL MATERIAL DE BASE M-1654-19.	41
FIGURA 14. CBR PARA MATERIAL DE BASE M-1654-19.	42
FIGURA 15. MR 1 PARA MATERIAL DE BASE M-1654-19.	43
FIGURA 16. MR 2 PARA MATERIAL DE BASE M-1654-19.	43
FIGURA 17. CURVA GRANULOMÉTRICA SUBBASE GRANULAR C.	45
FIGURA 18. CURVA DENSIDAD SECA MÁXIMA VS HUMEDAD ÓPTIMA PARA EL MATERIAL M-1644-19.	46
FIGURA 19. CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL DISEÑO DE MEZCLA.	50
FIGURA 20. CURVA GRANULOMÉTRICA PARA LA VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE MEZCLA.	58
FIGURA 21. PREPARACIÓN DE LA CANTIDAD DEL MATERIAL.	64
FIGURA 22. UBICACIÓN PARA AÑADIR EL MATERIAL DE DESECHO A LA PLANTA.	65
FIGURA 23. CARGADORA RECOLECTANDO LOS AGREGADOS DE PARA LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA.	66
FIGURA 24. DEPÓSITO DE LOS AGREGADOS EN LAS TOLVAS QUE ALIMENTAN LA PLANTA.	67

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 7 de 368
-----------------------------------	----------------	-----------------



FIGURA 25. TOLVAS DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN.	68
FIGURA 26. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CON MATERIAL DE DESECHO.	69
FIGURA 27. DOSIFICACIÓN MANUAL DEL MATERIAL DE DESECHO.	70
FIGURA 28. INGRESO DEL MATERIAL EN LA TUBERÍA DESIGNADA PARA LA PLANTA MEZCLADORA.	71
FIGURA 29. SALIDA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE LA PLANTA MEZCLADORA.	72
FIGURA 30. PROCESO DE RIEGO DE LIGA EN LA CONSTRUCCIÓN DE TRAMOS PARA EL HVS.	73
FIGURA 31. PROCESO DE RIEGO DE LIGA FINALIZADO.	74
FIGURA 32. MUESTREO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN LAS VAGONETAS.	75
FIGURA 33. ROTULACIÓN DEL TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN LAS CAJAS.	76
FIGURA 34. PAVIMENTADORA UTILIZADA EN LA CONSTRUCCIÓN.	77
FIGURA 35. PROCESO DE COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CON VAGONETA Y PAVIMENTADORA.	78
FIGURA 36. CONTINUACIÓN DEL PROCESO DE COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.	79
FIGURA 37. FINALIZACIÓN DE LA COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA DE UN TRAMO EXPERIMENTAL.	80
FIGURA 38. PROCESO DE COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.	81
FIGURA 39. VERIFICACIÓN DE PORCENTAJE DE VACÍOS CON EL DENSÍMETRO NUCLEAR.	82
FIGURA 40. VERIFICACIÓN DE VACÍOS FINAL CON EL DENSÍMETRO NUCLEAR.	83
FIGURA 41. PROCESO DE ACABO FINAL CON EL COMPACTADOR DE LLANTA DE HULE.	84
FIGURA 42. DEMARCACIÓN DEL TRAMO EXPERIMENTAL PARA EL ENSAYO DE FWD.	85
FIGURA 43. EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE FWD.	86
FIGURA 44. PUNTOS DE EVALUACIÓN CON EL FWD.	87
FIGURA 45. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS DE CONTROL (ESTADO: INICIAL).	88
FIGURA 46. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS DE CONTROL (ESTADO: FINAL).	89
FIGURA 47. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PET (ESTADO: INICIAL).	89
FIGURA 48. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PET (ESTADO: FINAL).	90



FIGURA 49. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PEAD (ESTADO: INICIAL). 90

FIGURA 50. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PEAD (CONDICIÓN: FINAL). 91

FIGURA 51. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 015 SIN ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 104

FIGURA 52. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 015 SIN ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 104

FIGURA 53. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 015 SIN ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 105

FIGURA 54. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 015 SIN ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 105

FIGURA 55. DEFLEXIONES PROMEDIO FWD Y RSD (CL1 Y CL5) PARA TRAMO 015 INICIAL Y FINAL. 107

FIGURA 56. PERFIL TRIDIMENSIONAL DEFORMADO PARA EL TRAMO 015 FINAL. 108

FIGURA 57. PERFIL TRANSVERSAL PROMEDIO DEFORMADO PARA EL TRAMO 015 FINAL. 109

FIGURA 58. EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PARA EL TRAMO 015. 109

FIGURA 59. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL PARA EL TRAMO 015. 111

FIGURA 60. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 019 CON ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 113

FIGURA 61. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 019 CON ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 113

FIGURA 62. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 019 CON ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 114

FIGURA 63. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 019 CON ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 114

FIGURA 64. DEFLEXIONES PROMEDIO FWD Y RSD (CL1 Y CL5) PARA TRAMO 019 INICIAL Y FINAL. 115

FIGURA 65. PERFIL TRIDIMENSIONAL DEFORMADO PARA EL TRAMO 019 FINAL. 116

FIGURA 66. PERFIL TRANSVERSAL PROMEDIO DEFORMADO PARA EL TRAMO 019 FINAL. 117

FIGURA 67. EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PARA EL TRAMO 019. 117

FIGURA 68. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL PARA EL TRAMO 019. 119



FIGURA 69. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 016 SIN ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 121

FIGURA 70. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 016 SIN ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 122

FIGURA 71. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 016 SIN ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 122

FIGURA 72. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 016 SIN ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 123

FIGURA 73. DEFLEXIONES PROMEDIO FWD Y RSD (CL1 Y CL5) PARA TRAMO 016 INICIAL Y FINAL. 124

FIGURA 74. PERFIL TRIDIMENSIONAL DEFORMADO PARA EL TRAMO 016 FINAL. 125

FIGURA 75. PERFIL TRANSVERSAL PROMEDIO DEFORMADO PARA EL TRAMO 016 FINAL. 126

FIGURA 76. EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PARA EL TRAMO 016. 126

FIGURA 77. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL PARA EL TRAMO 016. 128

FIGURA 78. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 020 CON ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 129

FIGURA 79. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 020 CON ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 130

FIGURA 80. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 020 CON ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 130

FIGURA 81. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 020 CON ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 131

FIGURA 82. DEFLEXIONES PROMEDIO FWD Y RSD (CL1 Y CL5) PARA TRAMO 020 INICIAL Y FINAL. 132

FIGURA 83. PERFIL TRIDIMENSIONAL DEFORMADO PARA EL TRAMO 020 FINAL. 133

FIGURA 84. PERFIL TRANSVERSAL PROMEDIO DEFORMADO PARA EL TRAMO 020 FINAL. 134

FIGURA 85. EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PARA EL TRAMO 020. 134

FIGURA 86. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL PARA EL TRAMO 020. 136

FIGURA 87. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 017 SIN ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 138

FIGURA 88. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 017 SIN ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 139



FIGURA 89. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 017 SIN ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 139

FIGURA 90. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 017 SIN ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 140

FIGURA 91. DEFLEXIONES PROMEDIO FWD Y RSD (CL1 Y CL5) PARA TRAMO 017 INICIAL Y FINAL. 141

FIGURA 92. PERFIL TRIDIMENSIONAL DEFORMADO PARA EL TRAMO 017 FINAL. 142

FIGURA 93. PERFIL TRANSVERSAL PROMEDIO DEFORMADO PARA EL TRAMO 017 FINAL. 143

FIGURA 94. EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PARA EL TRAMO 017. 143

FIGURA 95. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL PARA EL TRAMO 017. 145

FIGURA 96. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 021 CON ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 147

FIGURA 97. CUENCO DE DEFLEXIONES (RSD) TRAMO 021 CON ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 147

FIGURA 98. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 021 CON ACONDICIONAMIENTO A CERO PASADAS DE HVS. 148

FIGURA 99. CUENCO DE DEFLEXIONES (FWD) TRAMO 021 CON ACONDICIONAMIENTO AL MILLÓN PASADAS DE HVS. 148

FIGURA 100. DEFLEXIONES PROMEDIO FWD Y RSD (CL1 Y CL5) PARA TRAMO 021 INICIAL Y FINAL. 149

FIGURA 101. PERFIL TRIDIMENSIONAL DEFORMADO PARA EL TRAMO 021 FINAL. 150

FIGURA 102. PERFIL TRANSVERSAL PROMEDIO DEFORMADO PARA EL TRAMO 021 FINAL. 151

FIGURA 103. EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PARA EL TRAMO 021. 151

FIGURA 104. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL PARA EL TRAMO 021. 153

FIGURA 105. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÓDULOS PROMEDIO PARA FWD. 161

FIGURA 106. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO GLOBAL PARA EL AHUELLAMIENTO PROMEDIO DEL TRAMO. 164

FIGURA 107. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRAMOS SIN ACONDICIONAMIENTO PARA EL AHUELLAMIENTO PROMEDIO DEL TRAMO. 165

FIGURA 108. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRAMOS ACONDICIONADOS PARA EL AHUELLAMIENTO PROMEDIO DEL TRAMO. 165



FIGURA 109. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO GLOBAL PARA EL IRI PROMEDIO DE CADA TRAMO. 166

FIGURA 110. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRAMOS SIN ACONDICIONAMIENTO PARA EL IRI PROMEDIO DE CADA TRAMO. 167

FIGURA 111. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRAMOS ACONDICIONADOS PARA EL IRI PROMEDIO DE CADA TRAMO..... 167

FIGURA 112. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO GLOBAL PARA LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO PROMEDIO DE CADA TRAMO. 168

FIGURA 113. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRAMOS SIN ACONDICIONAMIENTO PARA LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE CADA TRAMO. 169

FIGURA 114. RESULTADO MINITAB ANOVA PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS TRAMOS ACONDICIONADOS PARA LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE CADA TRAMO. 169



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. <i>CARACTERÍSTICAS GENERALES PAQUETE ESTRUCTURAL PROPUESTO.</i>	36
TABLA 2. <i>RESPUESTAS TEÓRICAS ESTIMADAS.</i>	37
TABLA 3. <i>RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS MATERIAL DE BASE M-1654-19.</i>	38
TABLA 4. <i>GRANULOMETRÍA DE MATERIAL DE BASE M-1654-19.</i>	39
TABLA 5. <i>LÍMITES PARA MATERIAL DE BASE M-1654-19.</i>	40
TABLA 6. <i>ENSAYO PROCTOR MODIFICADO PARA EL MATERIAL DE BASE M-1654-19.</i>	41
TABLA 7. <i>CBR PARA EL MATERIAL DE BASE M-1654-19.</i>	42
TABLA 8. <i>RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS MATERIAL DE SUBBASE M-1644-19.</i>	44
TABLA 9. <i>GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA EL MATERIAL M-1644-19.</i>	44
TABLA 10. <i>GRANULOMETRÍA PARA EL AGREGADO FINO: POLVO PIEDRA.</i>	47
TABLA 11. <i>GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN PARA EL AGREGADO FINO: POLVO PIEDRA</i>	47
TABLA 12. <i>GRANULOMETRÍA PARA EL AGREGADO GRUESO: PIEDRA QUINTILLA.</i>	48
TABLA 13. <i>GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN PARA EL AGREGADO GRUESO: PIEDRA QUINTILLA</i>	48
TABLA 14. <i>GRANULOMETRÍA PARA LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA.</i>	49
TABLA 15. <i>PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS MARSHALL DE LA MEZCLA.</i>	50
TABLA 16. <i>GRANULOMETRÍA PARA EL AGREGADO FINO: M-1642-2019.</i>	52
TABLA 17. <i>GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN PARA EL AGREGADO FINO: M-1745-2021.</i>	53
TABLA 18. <i>GRANULOMETRÍA PARA EL AGREGADO GRUESO: M-1643-2019.</i>	53
TABLA 19. <i>GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN PARA EL AGREGADO GRUESO: M-1643-2019.</i>	54
TABLA 20. <i>GRANULOMETRÍA PARA PET: M-0626-2021.</i>	55
TABLA 21. <i>GRAVEDAD ESPECÍFICA Y DENSIDAD PARA EL PET: M-0626-2021.</i>	55
TABLA 22. <i>GRANULOMETRÍA PARA LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA.</i>	57
TABLA 23. <i>VOLUMETRÍA PARA LA ESCOGENCIA DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO M-1756-2021, MEZCLA DE CONTROL.</i>	58
TABLA 24. <i>PROPIEDADES DE DISEÑO MARSHALL PARA CONTENIDO DE ASFALTO ÓPTIMO MEZCLA M-1756-2021, MEZCLA DE CONTROL.</i>	59



TABLA 25. <i>VOLUMETRÍA PARA LA ESCOGENCIA DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO M-1758-2021, MEZCLA MODIFICADA CON 1% PET.</i>	60
TABLA 26. <i>PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS EXTRAÍDAS DE LOS TRAMOS EVALUADOS</i>	62
TABLA 27. <i>GRANULOMETRÍA DE LAS MEZCLAS EXTRAÍDAS DE LOS TRAMOS EVALUADOS.</i>	62
TABLA 28. <i>DENSIDADES DE COMPACTACIÓN EN SITIO.</i>	86
TABLA 29. <i>PARÁMETROS ESTRUCTURALES.</i>	92
TABLA 30. <i>ESTADOS DE COMPORTAMIENTO PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO CON BASES GRANULARES.</i>	96
TABLA 31. <i>ESTADOS DE COMPORTAMIENTO PARA TRAMOS HVS.</i>	96
TABLA 32. <i>NIVELES DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL O BENCHMARKING (BM) POR MEDIO DE PARÁMETROS DE CUENCO DE DEFLEXIONES.</i>	99
TABLA 33. <i>RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS DE CONTROL (INICIAL).</i>	100
TABLA 34. <i>RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS DE CONTROL (FINAL).</i>	100
TABLA 35. <i>RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PET (INICIAL).</i>	101
TABLA 36. <i>RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PET (FINAL).</i>	101
TABLA 37. <i>RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PEAD (INICIAL).</i>	102
TABLA 38. <i>RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PEAD (FINAL).</i>	102
TABLA 39. <i>RETROCÁLCULO DE MÓDULOS PARA LOS TRAMOS DE CONTROL.</i>	155
TABLA 40. <i>RETROCÁLCULO DE MÓDULOS PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PET.</i>	155
TABLA 41. <i>RETROCÁLCULO DE MÓDULOS PARA TRAMOS MODIFICADOS CON PEAD.</i>	156
TABLA 42. <i>DESEMPEÑO DE LAS MEZCLAS ANALIZADAS.</i>	157
TABLA 43. <i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO (ANOVA) COMPARATIVO DE DEFLECTOMETRÍA FWD Y RSD.</i>	159
TABLA 44. <i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO (ANOVA) COMPARATIVO DE MÓDULOS PROMEDIO PARA FWD.</i>	162



1 Introducción

1.1 Antecedentes

Este proyecto de investigación se circunscribe dentro de la línea de la sostenibilidad ambiental que persigue el cumplimiento de la Meta Carbono Neutralidad del país. Se pretende destacar los beneficios del uso de nuevas técnicas que contribuyen al desarrollo sostenible, a la economía del país y que a su vez impactan positivamente el desempeño de los materiales, como es el caso de las carreteras con Ant superficies asfálticas.

Las primeras investigaciones en el análisis de asfaltos modificados proponen el uso de ensayos de Espectroscopía Raman, Análisis termogravimétrico (TGA), Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) y Espectrometría Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR), para el control de calidad de los polímeros.

Uno de los primeros pasos realizados en proyectos de investigación con materiales de desecho en el país, consistió en el uso de bolsas de polietileno utilizadas en la producción de banano como un posible modificador para el asfalto convencional LPI-03 (AC-30). El proyecto presenta las propiedades del material y evalúa la viabilidad de reutilizarlo y reincorporarlo en la producción de un nuevo material, a través de la medición de cambios en el desempeño del asfalto (Villegas *et al*, 2012).

En el 2015 se desarrolló una investigación que analiza el desempeño de la mezcla asfáltica con asfalto modificado con dos materiales de desecho: bumper (parachoques de automóviles) y polipropileno. Los asfaltos fueron clasificados reológicamente, mostrando mejoras en las propiedades de recuperación, resistencia a la fatiga y a la deformación del material respecto al asfalto original. A nivel de mezcla asfáltica, los ensayos de APA, Resistencia a la Tensión Diametral y Módulo Resiliente revelan una mejora en el desempeño de las mezclas que contienen asfaltos modificados con los diferentes desechos (Aguar *et al*, 2015).

Algunos de los productos sugeridos son el caucho presente en los *bumpers* (parachoques) de los automóviles y el polipropileno y polietileno para el empaque de banano. Es de resaltar

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 15 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



que, debido a las políticas país, los desechos son vistos como aliados para el aporte en la ciencia y tecnología, debido a una creciente preocupación de la ciudadanía por definir mecanismos para reutilizar y reciclar (Villegas, *et al*, 2018). A continuación, se definen algunas recomendaciones generales:

1. Utilizar el menor tamaño de partícula del modificante como sea posible. Esto evitará complicaciones como heterogeneidad y segregaciones de dicho material en la matriz de la mezcla asfáltica.
2. Homogenizar el modificante con los agregados antes de la preparación de la mezcla asfáltica.
3. Establecer según el estudio del modificante la temperatura y el tiempo de mezclado.
4. Siempre realizar un diseño de mezcla y probar los valores de este con ensayos de laboratorio.

1.2 Experiencias internacionales

En esta sección se exponen las experiencias recopiladas con respecto al diseño de mezclas bituminosas que incluyen plástico como sustituto de un porcentaje del agregado mineral. Se presentan resultados obtenidos de múltiples proyectos desarrollados en distintos países como Reino Unido, Malasia, Indonesia e Irán.

En el Reino Unido, se utilizó el polietileno de baja densidad reciclado sustituyendo hasta una porción máxima de 30% de agregado entre dos tamaños específicos (2,36 mm a 5 mm). Dependiendo del tamaño de las partículas y un diseño apropiado, se obtuvieron mezclas menos susceptibles al envejecimiento y agrietamiento, además el rendimiento de producción tuvo un incremento. (Zoorob y Suparma, 2000). Los resultados permiten concluir que la producción de mezclas asfálticas con plástico es viable sin necesidad de modificar las plantas de producción actuales. Respecto a la mezcla asfáltica, se obtuvo mejores parámetros de estabilidad Marshall, gravedades específicas menores y mayor resistencia ante la deformación permanente, al ser comparadas con mezclas convencionales (no modificadas).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 16 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



En Malasia se han utilizados plásticos de Tereftalato de Polietileno (PET por sus siglas en inglés) y Polietileno Reciclado de Alta Densidad (PEAD o HDPE por sus siglas en inglés) para sustituir desde el 5% hasta el 25% del agregado mineral con tamaños entre 1,18 mm y 3,36 mm para el plástico PEAD y 1,18 mm y 2,36 mm para el plástico PET en una mezcla asfáltica. Dentro de los resultados obtenidos se incluyen mejoras en el desempeño a fatiga y a deformación permanente. Además, las mezclas asfálticas con sustitución del 15% y 20% mostraron un aumento de rigidez al ser comparadas con una mezcla convencional (Rahman *et al*, 2014). De acuerdo con Moghaddam, *et al*, (2013), la vida a fatiga de las mezclas asfálticas con botellas plásticas es más larga en comparación con la mezcla no modificada. La flexibilidad de las mezclas se incrementa posponiendo la creación de grietas y su propagación.

En Indonesia se realizaron proyectos que buscaban sustituir hasta un 100% del agregado mineral entre las mallas N° 30 y N° 40. El esquema experimental se centra en el análisis exhaustivo de la mezcla con el 25% de sustitución del agregado mineral, debido a que cumplía con las especificaciones del diseño de mezcla para Indonesia (Aschuri *et al.*, 2016). Dentro de los resultados obtenidos para esta mezcla se identificó mejoras en la rigidez, estabilidad Marshall, resistencia a la deformación permanente y resistencia ante el daño por humedad. Con base en los resultados los autores recomiendan la utilización de la mezcla para capa de rodamiento.

Del proyecto en Irán, se tiene el uso del plástico PET para sustituciones del 20% al 60% del agregado mineral entre los 2,36mm y 4,75 mm. En este caso, se observa que las mezclas asfálticas con plástico presentan una disminución de su gravedad específica en comparación con las mezclas convencionales. Los resultados mostraron una disminución en la estabilidad de Marshall y un aumento en el flujo en las mezclas con plástico (Hassani, Ganjidoust y Maghnaki, 2005).



1.2.1 Dosificaciones y tamaños típicos utilizados de material reciclado

En vista de la experiencia anterior, se resume a continuación las dosificaciones y tamaños utilizados del plástico como sustituto de un porcentaje del agregado mineral en una mezcla asfáltica:

- Reemplazo con plástico del 30% del volumen del agregado entre 2,36 mm (Malla N° 8) y 5 mm (Malla N° 4) (Zoorob y Suparma, 2000).
- Reemplazo con plástico del 5% hasta el 25% del peso de la mezcla asfáltica. El tamaño del plástico es de aproximadamente 2 mm, por lo que sustituye el agregado mineral entre las mallas 3,36 mm (Malla N° 8) y 1,18 mm (Malla N° 16) (Rahman et al., 2014).
- Reemplazo con plástico del 5% hasta el 25% del peso de la mezcla asfáltica. Se sustituye el agregado mineral entre las mallas 3,36 mm (Malla N° 6) y 1,18 mm (Malla N° 16) (Rahman et al, 2014).
- Reemplazo con plástico del 25%, 50% y hasta 100% del peso agregado mineral pasando la malla N° 30 y retenido en la malla N° 40 (Aschuri, et al. 2016).
- Reemplazo con plástico del 20% hasta el 60% por volumen del agregado mineral entre 2,36 mm (Malla N° 8) y 4,75 mm (Malla N° 4). El tamaño del plástico triturado es de aproximadamente 3 mm (Hassani et al., 2005).

1.2.2 Modo de incorporación en planta

De acuerdo con Zoorob y Suparma (2000), uno de los beneficios del uso de la técnica de sustitución del agregado mineral por plástico corresponde a que no se requiere de la modificación de las plantas de producción de mezclas asfálticas existentes para la incorporación del plástico. Por tal razón, la fabricación de este tipo de mezclas puede realizarse con los procedimientos estándares, en donde solo se requiere la sustitución del porcentaje correspondiente del agregado mineral del tamaño definido por plástico antes del proceso de mezclado con el asfalto.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 18 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



Un factor importante que se debe controlar en el diseño de estas mezclas es la temperatura. Dependiendo de las características del plástico utilizado la temperatura podrá causar su derretimiento, afectando la trabajabilidad de la mezcla. Lo más recomendable es utilizar una temperatura en donde el plástico se encuentre cerca de su punto de fusión antes de la compactación, ya que esto logra una mejor adherencia entre el plástico y el agregado, generando una mezcla más fuerte (Zoorob y Suparma, 2000).

La desventaja de controlar la temperatura en términos del punto de fusión del plástico es que el plástico presente un punto de fusión bajo, de modo que, al trabajar con temperaturas bajas durante el proceso de mezclado, la viscosidad del ligante asfáltico puede verse afectada, por lo que en este tipo de mezcla debe buscarse una temperatura de balance entre ambas propiedades de los materiales (plástico y asfalto). Por lo general, se da un sacrificio en la viscosidad del ligante para lograr la producción de este tipo de mezclas asfálticas (Zoorob y Suparma, 2000).

1.2.3 Detalles constructivos y de diseño

Dentro de los resultados que pueden esperarse, según la literatura, en el comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas al realizar la sustitución de un porcentaje del agregado mineral por plástico, se encuentran:

- Aumento en la resistencia ante la deformación permanente.
- Mejor desempeño en la resistencia al agrietamiento por fatiga
- Mayor resistencia al daño por humedad.
- Mayor resistencia al envejecimiento.
- Problemas de adherencia entre el asfalto y el plástico.
- Disminución en la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica conforme aumenta la cantidad de plástico.

Las experiencias expuestas anteriormente demuestran viabilidad para el diseño de mezclas asfálticas con incorporación de plástico reutilizado, dejando abierto un campo de estudio para el análisis a través de pruebas de laboratorio enfocadas al desempeño de las mezclas

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 19 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



y la construcción de tramos experimentales en campo para su evaluación, bajo cargas de tráfico más realistas y simulado condiciones climáticas típicas de la región.

1.3 Contexto nacional

En Costa Rica ya se encuentra vigente una ley para el uso de materiales reutilizables en pavimentos y obras de infraestructura vial, por ende, en mezclas asfálticas en estructuras de pavimentos al. En general, la ley pretende promover el uso gradual de tecnologías de reciclaje en la producción de mezclas asfálticas para carreteras. Las tecnologías que implican la técnica de reciclado en pavimentos son diversas, y entre ellas se incluye el concepto de pavimentos asfálticos reciclados (RAP por sus siglas en inglés). A manera de referencia (NAPA, 2018), en Estados Unidos se utilizaron 82,2 millones de toneladas de RAP en el 2018, lo que se traduce en una reducción de 23 millones de barriles de asfalto y 78 millones de toneladas de agregado virgen, lo que resulta en ahorros económicos y de recursos muy importantes, sobresaliendo la reducción de la huella de carbono.

De forma similar, la ley abre la posibilidad de utilizar plásticos o polímeros reciclados en la producción de mezcla asfáltica, temática que coincide directamente con el objetivo del proyecto “Diseño, Construcción y Evaluación del Desempeño de Mezcla Modificada con Material de Desecho”, dentro del cual se enmarca el presente informe el cual servirá como insumo importante a la Administración para validar las tecnologías propuestas por la ley precitada.

2 Objetivos y Alcance

2.1 Objetivo general

Analizar el desempeño a escala natural de las mezclas asfálticas modificadas con Polietileno Tereftalato (PET) y Polietileno de alta densidad (PEAD), respecto a una mezcla convencional.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 20 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



2.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades fisicoquímicas de los PET (Polietileno Tereftalato) y PEAD (Polietileno de alta densidad) utilizados en el proceso de modificación de la mezcla asfáltica.
- Validar y producir una mezcla asfáltica modificada con PET y PEAD para ser utilizada como superficie de ruedo.
- Construir tramos de prueba con mezcla asfáltica modificada con materiales de desecho.
- Evaluar el desempeño de estructuras de pavimento con mezcla asfáltica modificada con plásticos reciclados mediante el uso del HVS en condiciones controladas de laboratorio.
- Evaluar el desempeño de estructuras de pavimento con mezcla asfáltica modificada con materiales de desecho mediante la aplicación de ensayos no destructivos como deflectometría de impacto, regularidad y fricción.
- Crear un protocolo de acondicionamiento con temperatura para el ensayo a escala natural que permita evaluar el desempeño de las mezclas a diferentes condiciones.

2.3 Alcance

El informe final para la etapa I de la investigación titulada “Diseño, Construcción y Evaluación del Desempeño de Mezclas con Materiales de Desecho” posee los siguientes alcances:

- Evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica convencional modificadas con dos materiales reciclados: Polietileno Tereftalato (PET) y otra con una mezcla Polietileno de alta densidad (PEAD) y otros plásticos de desecho industrial.
- La verificación de la calidad de las mezclas asfálticas modificadas con Polietileno Tereftalato (PET) y otra con Polietileno de alta densidad (PEAD) fue realizado en la Universidad de Costa Rica.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 21 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



- No se contó con una muestra del plástico que se utilizó en la mezcla con PEAD, sin embargo, se detectó que este modificante posee PEAD junto con otros plásticos de desecho industrial.
- Se utilizó un diseño de mezcla patrón y una estructura de pavimento generada por parte de los propios desarrolladores del proyecto.
- La mezcla asfáltica utilizada y los tramos de estudio fueron construidos por una empresa constructora, externa a la Universidad de Costa Rica.
- Para ambos tipos de modificantes, se empleó 1,0% en peso de la mezcla asfáltica. Este contenido fue establecido como producto de revisiones previas realizadas dentro del LanammeUCR.
- Se consideraron dos tratamientos por tipo de mezcla, sin acondicionamiento térmico y con acondicionamiento térmico.
- Se construyó un tramo de estudio para cada tipo de tratamiento, sin embargo, cada uno de los tramos poseen diversos puntos de control (muestras), con sus respectivas repeticiones.
- Los tramos de estudio poseen controles periódicos por medio de Ensayos no destructivos (NDT, por sus siglas en inglés). Se hicieron análisis de deflectometría, regularidad, fricción, deformaciones en la superficie de pavimento, entre otros.

3 Esquema Experimental

En esta sección se describen las generalidades del esquema experimental de los tramos de prueba con mezcla asfáltica modificada con materiales reciclados, así como el tramo control de referencia, evaluados con el Simulador de Vehículos Pesados (HVS por sus siglas en inglés) en el LanammeUCR.

A continuación, se detallan diferentes características de los tramos construidos, distribución, longitud, tipo de pavimento, espesores de las capas, el diseño de mezcla

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 22 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



asfáltica utilizado, el proceso de construcción asociado a los tramos, entre otros aspectos importantes que inciden en los resultados, análisis y conclusiones derivadas.

3.1 Ubicación y distribución de los tramos

Los tramos de prueba experimentales de mezcla asfáltica con incorporación de materiales plásticos reutilizables fueron construidos en el Edificio C del LanammeUCR de la Universidad de Costa Rica, en San Pedro de Montes de Oca de Costa Rica, el 20 de septiembre del 2019. En la Figura 1 se muestra la localización geográfica del sitio, muy cercano al campus principal de la Universidad de Costa Rica en San Pedro de Montes de Oca, San José (Ciudad de la Investigación).



Figura 1. Ubicación del Edificio C de LanammeUCR; Montes de Oca, San José, Costa Rica (9.9358591°N, -84.0446636°O). Fuente: Google Earth, 2020.

El edificio de referencia cuenta con una zona dispuesta para ensayos acelerados en pavimentos, y es donde se construyeron las pistas de ensayo. Este espacio cuenta con las dimensiones suficientes para permitir la construcción de múltiples tramos experimentales y

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 23 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



también albergar al Simulador de Vehículos Pesados (HVS) durante el desarrollo del experimento.

La configuración de los tramos de ensayo fue sometido a un proceso de diseño, sugerencias y revisión por parte de asesores técnicos de la Alianza Internacional HVS (HVSIA, por sus siglas en inglés). La HVSIA, congrega a importantes investigadores a nivel mundial, los cuales son usuarios de este tipo de equipos y disponen de amplia experiencia en este campo de investigación.

Los tramos se localizan en un área pavimentada de forma rectangular, con una superficie de 180,73 metros cuadrados y una profundidad que varía entre los 2,55 metros y los 2,75 metros. Se realizó la construcción de tres franjas con dimensiones de 2,05 m de ancho y 22,04 m que contienen seis tramos experimentales a evaluar.

Las capas granulares (subbase y base) son similares en todos los casos. La diferencia entre cada tramo es el material de desecho con el que se modifica la mezcla asfáltica de la estructura. Se tienen dos pistas con mezcla asfáltica modificada con plástico PET (Tereftalato de polietileno) y dos pistas modificadas con PEAD (Polietileno de alta densidad). Los dos tramos restantes corresponden a los tramos de control (mezcla bituminosa de granulometría densa con Tamaño Máximo Nominal de 12,5mm). La siguiente figura presenta un diagrama de la configuración y distribución de los tramos de evaluación dentro del área de estudio.

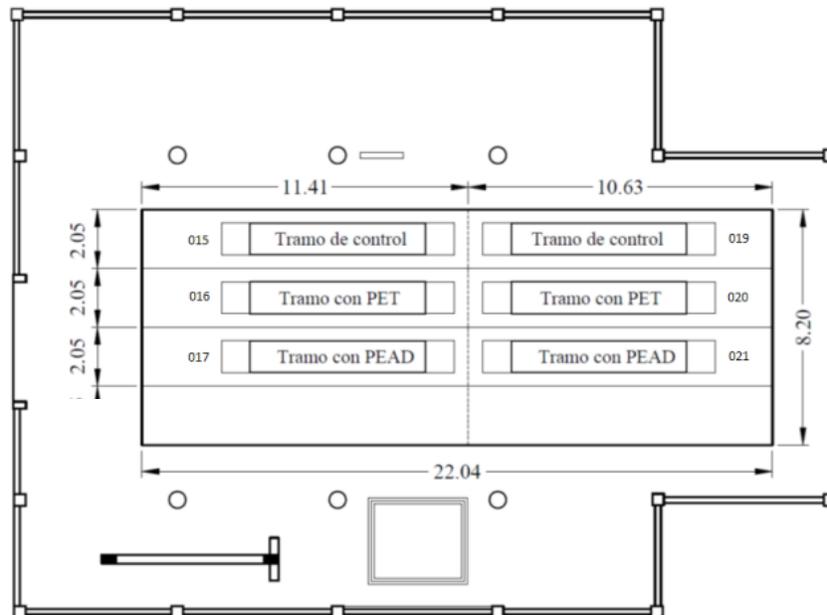


Figura 2. Vista en planta del espacio donde se encuentran localizados los tramos (cotas en metros) y ubicación de tramos.

3.2 Descripción de los ensayos y mediciones a realizar

3.2.1 Ensayo a Escala con el Simulador de Vehículos Pesados

El Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés) es un equipo especializado de la Universidad de Costa Rica, a cargo del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Esta herramienta simula cargas de tránsito pesado de forma acelerada, por medio de técnicas de evaluación de pavimentos no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés) analiza el desempeño del pavimento, dentro de estas evaluaciones se realizó: deflectometría de impacto, Índice de regularidad internacional IRI, deformación permanente, pérdida de fricción, entre otros.



Figura 3. Simulador de Vehículos Pesados, HVS Mark VI de Dynatest.

Este equipo está clasificado dentro de la categoría APT, por el acrónimo en inglés de Ensayos Acelerados de Pavimentos, por el comité AFD40 del TRB. La subcategoría de clasificación corresponde a un equipo lineal móvil, el cual tiene la particularidad de poder ser utilizado dentro de las instalaciones especializadas y construidas para este fin específico, con la posibilidad de desplazarse a diferentes sitios para realizar los ensayos.

Una vez construidos los tramos de ensayo, y previo a la aplicación de las cargas con el HVS, se realizó deflectometría de impacto sobre la estructura. De esta manera se pudo tener una medición de la capacidad estructural inicial de los diferentes tramos. Esta información se muestra en el capítulo 6.1.

El siguiente paso fue la colocación del equipo (HVS) sobre el tramo a ensayar y dar inicio a la aplicación de carga. Antes de aplicar las primeras repeticiones de carga que forman parte del experimento se hace una medición de la superficie del tramo (perfil) mediante la secuencia programada en el equipo HVS con sensores láser que posee. Esta medición establece la referencia inicial contra la cual se medirá la deformación acumulada durante el ensayo.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 26 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



Con las primeras aplicaciones de carga se generan rápidamente deformaciones permanentes iniciales en la estructura, debido a un proceso de acomodación de las partículas de agregados minerales y post-compactación de la mezcla asfáltica y capas granulares. Por esta razón las primeras mediciones se realizan luego de aplicar pocas repeticiones de carga. De esta manera la información correspondiente a este proceso con alta tasa de deformación inicial puede ser debidamente recolectada y aprovechada.

Como el ensayo es por duplicado para cada condición, el ensayo inicial en cada tramo es realizado a temperatura ambiente para evaluar la condición de agrietamiento por fatiga y en el segundo escenario se utilizará la cámara térmica (temperatura del pavimento de 40 °C) para analizar el desempeño ante la deformación permanente.

3.2.2 Esquema de carga

Se realiza un patrón de carga que inicia en los 40 kN con incrementos de 10 kN cuando no se sobrepasen los umbrales establecidos, los cuales se definieron en 12,5 mm de deformación permanente para los tramos sin acondicionar, 16,5 mm en los tramos acondicionados y en un 30 % de rigidez residual para MAC. Con base en resultados previos y con el propósito de mantener una tasa de daño constante (bajo el punto de aplicación de carga) se recomendó monitorear las deflexiones cada 100000 repeticiones de carga. Si la tasa de daño disminuye, se podría considerar una revisión cada 200000 repeticiones con un aumento recomendado de 10 kN. El esquema de carga final utilizado en los tramos analizados fue 400000 repeticiones de 40kN, 200000 repeticiones de 50kN y 400000 repeticiones a 60kN.

Se estableció una secuencia de aplicaciones de carga, considerando al menos 20000 repeticiones de carga por día (bidireccional), 5 días a la semana (100 000 repeticiones por semana). Dentro del Anexo 1 y Anexo 2 se exponen en detalle los esquemas completos de aplicaciones de carga final, tanto para los tramos de prueba sin acondicionamiento y con acondicionamiento por temperatura. El número completo de aplicaciones de carga establecido corresponde a la aplicación aproximada $3,2 \times 10^6$ ESAL cada 2,5 meses.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 27 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



3.3 Mediciones realizadas durante el ensayo acelerado

Para los seis tramos experimentales se utilizaron equipos complementarios al HVS, que permitieron obtener las diferentes respuestas del pavimento. A continuación, se detallan cada uno de los equipos utilizados.

- Perfilómetro láser 3D automatizado (RSP)

Por medio del perfilómetro, se realizaron mediciones longitudinales y transversales de la superficie de ensayo, de esta manera se generó un perfil tridimensional del tramo en evaluación. Con este perfil tridimensional se observaron las deformaciones permanentes y ahuellamiento progresivo sobre el tramo. Asimismo, se hizo posible el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) con los datos brindados por el dispositivo. A continuación, se observa una figura del equipo y un ejemplo de la salida de datos de la deformación para un tramo.



Figura 4. Perfilómetro láser.

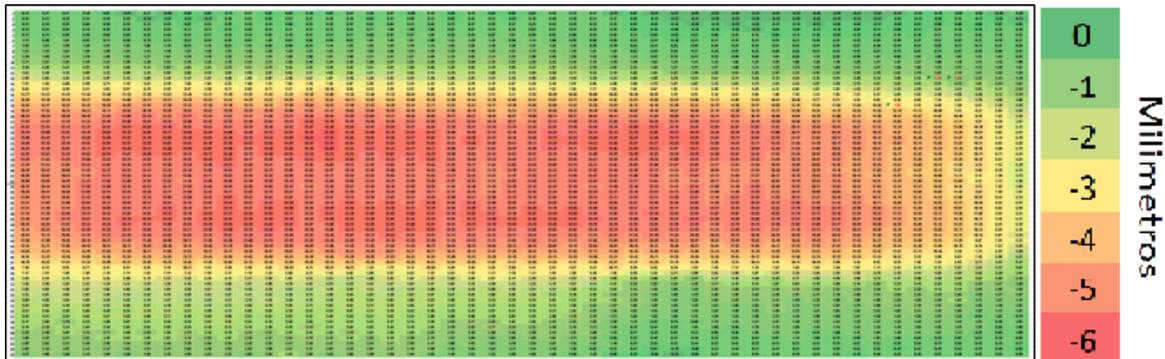


Figura 5. Ejemplo de matriz de datos de deformación.

- Deflectómetro de Impacto (FWD)

Por medio del Deflectómetro de impacto se analizaron las condiciones estructurales del pavimento producto de la aplicación de una carga puntual que contempla esta metodología. Los análisis se realizaron tanto antes de iniciar los procesos de evaluación y también al finalizar la cantidad total de pasadas del HVS, con el fin de conocer la capacidad estructural inicial y final de cada una de las pistas y la evolución de la pérdida de capacidad estructural producto de la aplicación de cargas. En la **Figura 6** se muestra la distribución de los puntos de evaluación.

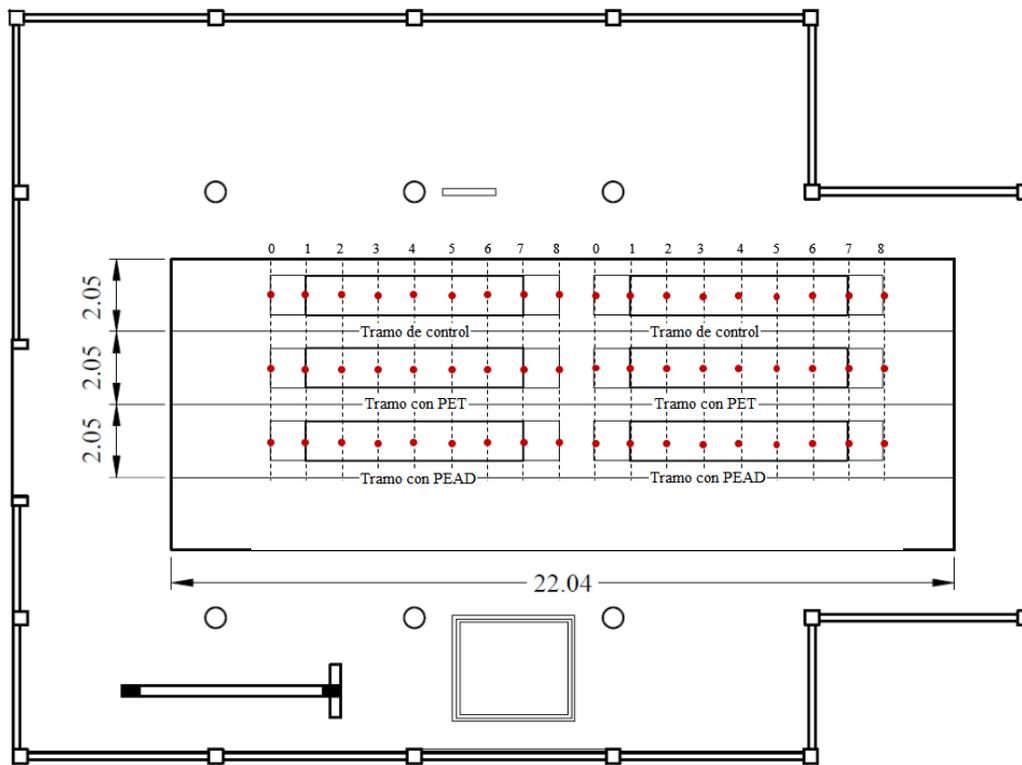


Figura 6. Ensayos de deflectometría de impacto.

- Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)

La deflexión de la superficie del pavimento es un parámetro importante de respuesta estructural para dar seguimiento a la evolución del deterioro en las distintas capas que conforman el paquete estructural del pavimento. Mediante el uso del RSD se midieron las deflexiones sobre la superficie en el pavimento conforme la rueda del equipo se aproxima al sensor ubicado en el extremo delgado de la viga, como se muestra en la **Figura 7**.



Figura 7. Deflectómetro de superficie del pavimento.

Este instrumento también permite documentar el deterioro progresivo que sufre la estructura conforme avanza el número de repeticiones de carga y fue empleado para medir deflexiones en diferentes zonas de cada tramo experimental, los cuales posteriormente permitieron la estimación de módulos de las diferentes capas del pavimento. En la **Figura 8** se observa un ejemplo de los resultados brindados por este equipo.

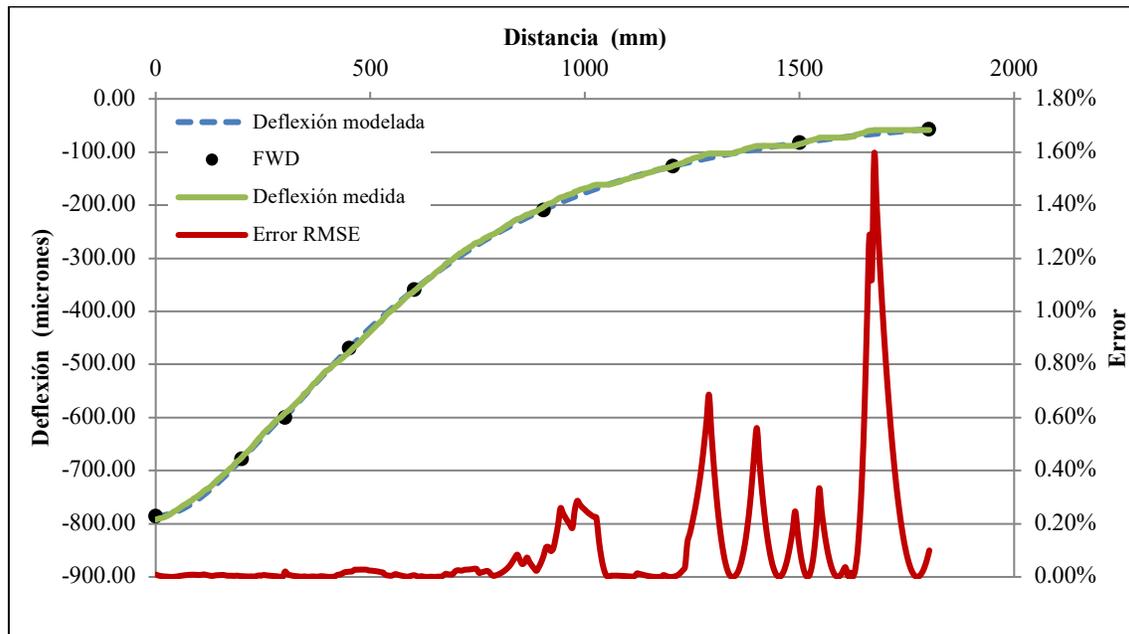


Figura 8. Ejemplo de deflexión medida y deflexión modelada.

- Termopares

Son sensores de temperatura, instalados en la superficie y cierta profundidad dentro de la capa de mezcla asfáltica que permiten correlacionar la temperatura y la deformación de la superficie. Están hechos con 2 cables, uno de níquel y el otro de cromo y registran temperaturas entre -180 y 1300 °C. Funcionan con voltajes generados por el aumento de temperatura.



Figura 9. Ejemplo de monitoreo y demarcación de agrietamiento en tramo de prueba.

- Agrietamiento

Se monitoreó y generó un registro fotográfico del estado superficial del tramo de prueba de manera que se pueda cuantificar el avance de las grietas con la finalidad de cuantificar el fisuramiento por fatiga (con base a un área superficial agrietada).

- Análisis de desprendimiento de microplásticos

Se analizó la existencia de desprendimiento de microplásticos durante la ejecución del ensayo, en donde se realizó un barrido del tramo y se recolectó el material barrido para analizar la presencia de microplásticos. Este protocolo de ensayo se explica en el **Anexo 3**.

3.4 Acondicionamiento para tramos de estudio

Dentro del estudio realizado, se desarrollaron los controles en dos partes o escenarios. Para la primera parte del estudio se analizaron todos los tramos no acondicionados o a temperatura ambiente (tramo 015, tramo 016 y tramo 017), y para la segunda parte del

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 33 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



estudio, se incluyeron los tramos acondicionados a una temperatura (tramo 019, tramo 020 y tramo 021).

El acondicionamiento por temperatura antes indicado consta de un acondicionamiento térmico por medio de lámparas infrarrojas, las cuales aumentan la temperatura del pavimento (a 5 cm de profundidad) entre 40 y 42 °C en promedio. Este es realizado mediante el uso de la cámara climática del HVS.

La temperatura fue determinada a partir del proyecto de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo desarrollado por el LanammeUCR, con base a registros climáticos de las secciones del control del proyecto. El acondicionamiento posee una configuración cíclica, es decir, de 6 am hasta las 10 pm se realiza la aplicación de temperatura por medio de las lámparas y las horas restantes del día se dejan sin aplicación de temperatura y con una restitución de la temperatura ambiente teórica.



Figura 10. Cámara climática para acondicionamiento térmico.



4 Estructura de Pavimentos y Caracterización de Materiales

Con base en los resultados obtenidos durante el *Primer Ensayo Acelerado de Pavimentos a Escala Natural* (proyecto VI B5A43), realizado entre el 2013 y 2018, se definió la siguiente estructura para los tramos experimentales. La estructura consiste en un sistema de pavimento flexible de tres capas. Ver **Figura 11**.

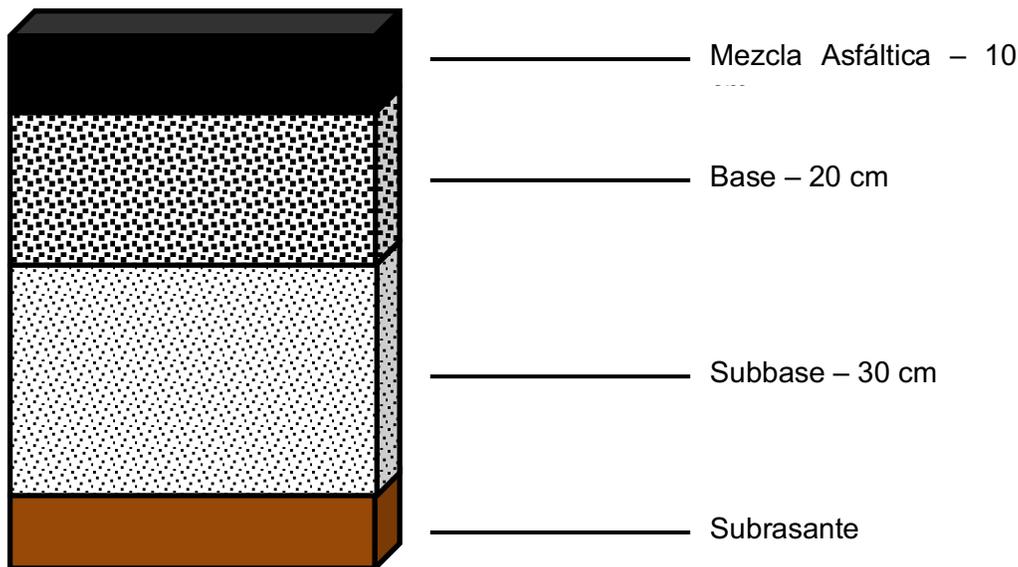


Figura 11. Estructura de los tramos experimentales.

El material de la subrasante corresponde al mismo que se encuentra en el lugar de construcción del Edificio C del LanammeUCR (MH según clasificación SUCS ó A-7-5 según AASHTO, CBR 3%), mientras que para la subbase y base granular, se utilizaron materiales que cumplen con lo establecido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2020). La caracterización de los materiales mencionados se presenta en el siguiente apartado.

4.1 Diseño preliminar y respuestas mecánicas esperadas

La vida útil de la estructura de pavimento colocada se estimó con base en los resultados del experimento previo. Los criterios de falla considerados son los siguientes:

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 35 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



1. Deformación permanente promedio en la superficie del pavimento de 12,5 mm en los tramos sin acondicionar, y hasta 16,5 mm acondicionado.
2. Reducción de la capacidad estructural por medio del análisis del módulo elástico, donde la reducción de cualquiera de las capas que conforman el paquete de pavimento no deberá presentar valores menores o iguales al 30% del valor inicial de módulo.

Para estimar la posible vida útil, se tomaron como referencia las especificaciones de materiales utilizados en el **Primer Ensayo Acelerado de Pavimentos a Escala Natural** (proyecto VI B5A43), realizado entre el 2013 y 2018. Los parámetros considerados se muestran en la **Tabla 1**. Sin embargo, estos datos han sido actualizados a través de ensayos de FWD y retrocálculo de módulos (ver capítulo de resultados).

Tabla 1. Características generales paquete estructural propuesto.

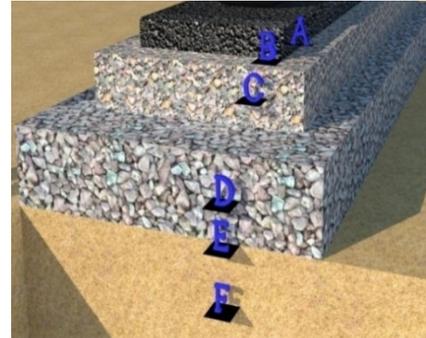
Capa	Espesor	Módulo (típicos primer experimento HVS)
MAC	10 cm	3500 MPa
Base granular	20 cm	170 MPa
Subbase	30 cm	140 MPa
Subrasante	-	70 MPa

Para estimar las respuestas se realizó una modelación a través de la teoría de multicapa elástica. Los datos de entrada (características mecánicas de los materiales) se presentan en la tabla anterior. La configuración de carga empleada corresponde a un eje simple dual de 40 kN (carga), con 690 kPa. Los puntos de interés, respuestas críticas, se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 2. Respuestas teóricas estimadas.

Punto	ϵ_t (μS)	ϵ_c (μS)
A (fibra intermedia MAC)	-	84
B (fibra inferior MAC)	236	-
C (fibra intermedia BG)	-	486
D (fibra intermedia SB)	-	302
E (fibra superior SR)	-	271
F (15,2 cm bajo la SR)	-	244



De acuerdo con las estimaciones realizadas a través de modelos de daño (pérdida de rigidez), generados en el LanammeUCR, la vida útil de esta estructura para una pérdida de rigidez de hasta el 60% en la MAC podría ser por el orden de 14×10^6 ESALS a 18×10^6 ESALS.

Según modelos de desempeño de la guía estadounidense *AASHTOWare Pavement ME Design*, la vida a fatiga de dicha estructura podría ser de $3,5 \times 10^6$ ESALS. Un ahuellamiento del 12,5 mm se podría alcanzar entre $0,9 \times 10^6$ y $3,0 \times 10^6$ ESALS. Por esta razón, se propuso un esquema de ensayo que se ajuste a los resultados obtenidos en experimentos anteriores y con base en el nuevo tramo de control. Dicho esquema de carga se puede consultar en la sección 3.2.2.

4.2 Caracterización de materiales granulares

Base granular: M-1654-19 (Tajo El Común)

La base consiste en agregado de tajo color grisáceo, procedente del río Tapezco (Zarcero, Alajuela), con Tamaño Máximo Nominal (TMN) de 19,0 mm, es no plástico (NP) y se clasifica en el subgrupo A-1-a (0) de acuerdo con el sistema de clasificación de suelos AASHTO M 145. Este material cumple con las características físicas y mecánicas indicadas



en la especificación CR 2020. Los resultados de la caracterización efectuada en el laboratorio se presentan entre la **Tabla 3** y **Tabla 7**.

Tabla 3. Resumen de características material de base M-1654-19.

Característica	Propiedad del material	Especificación CR2020
Gravedad específica gruesos	2,06	No específica
Gravedad específica finos	2,03	No específica
Índice durabilidad gruesos y finos	76,3	35% mínimo
Caras fracturadas	100%	50 % mínimo
Abrasión	33%	50 % máximo

El análisis de la distribución de tamaños de partículas (granulometría) se realizó de acuerdo con los procedimientos de los métodos de ensayos AASHTO T27 y AASHTO T11, según lo indica el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2020 para materiales granulares.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4 y la Figura 12 mostrados a continuación.



Tabla 4. Granulometría de material de base M-1654-19.

Tamiz	% Pasando	Especificación CR 2020
Tamiz 25,0 mm (1")	100	100
Tamiz 19,0 mm (3/4")	97	86-100 (± 6)
Tamiz 12,5 mm (1/2")	86	-
Tamiz 9,5 mm (3/8")	78	51-82 (± 6)
Tamiz N°4	61	36-64 (± 6)
Tamiz N°8	46	-
Tamiz N°16	35	-
Tamiz N°30	27	-
Tamiz N°40	24	12-26 (± 4)
Tamiz N°50	21	-
Tamiz N°200	10	4-7 (± 3)

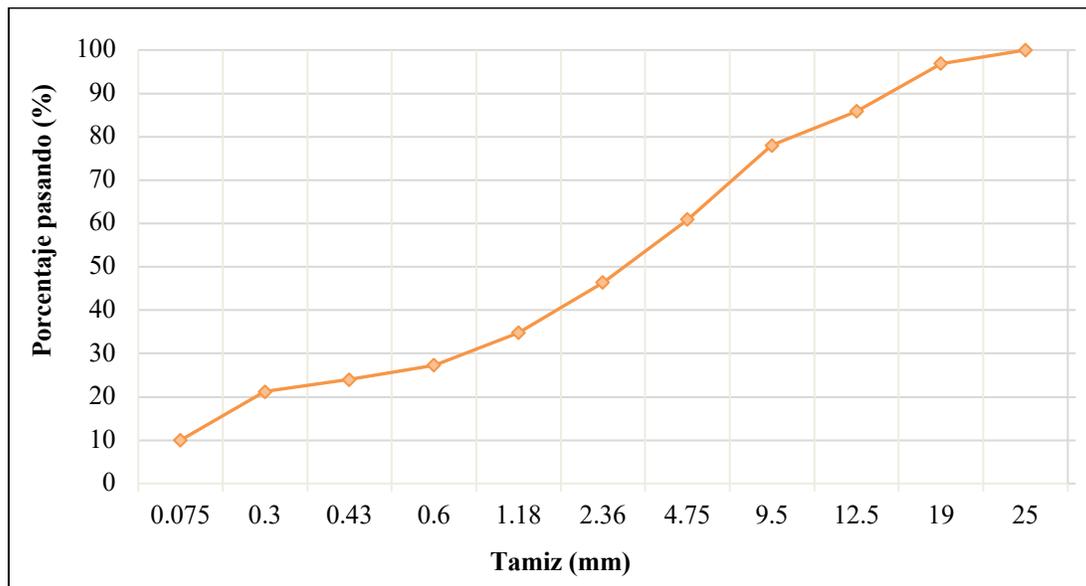


Figura 12. Curva granulométrica para el material de base granular.



- Límites de Atterberg (AASHTO M 147)

Tabla 5. Límites para material de base M-1654-19.

Característica	Propiedad del suelo	Especificación CR 2010
Límite Líquido	NP	25% Máximo
Límite Plástico	NP	6% Máximo
Índice de Plasticidad	NP	No especifica

*NP: No Plástico



- Densidad seca máxima y humedad óptima (AASHTO T 180)

Tabla 6. *Ensayo Proctor modificado para el material de base M-1654-19.*

Ensayo	Proctor Modificado
Método	C
Preparación del material	Seco al aire
Contenido de agua óptimo	6,5 %
Densidad seca máxima estándar	1760 kg/m ³
Mazo	Mecánico

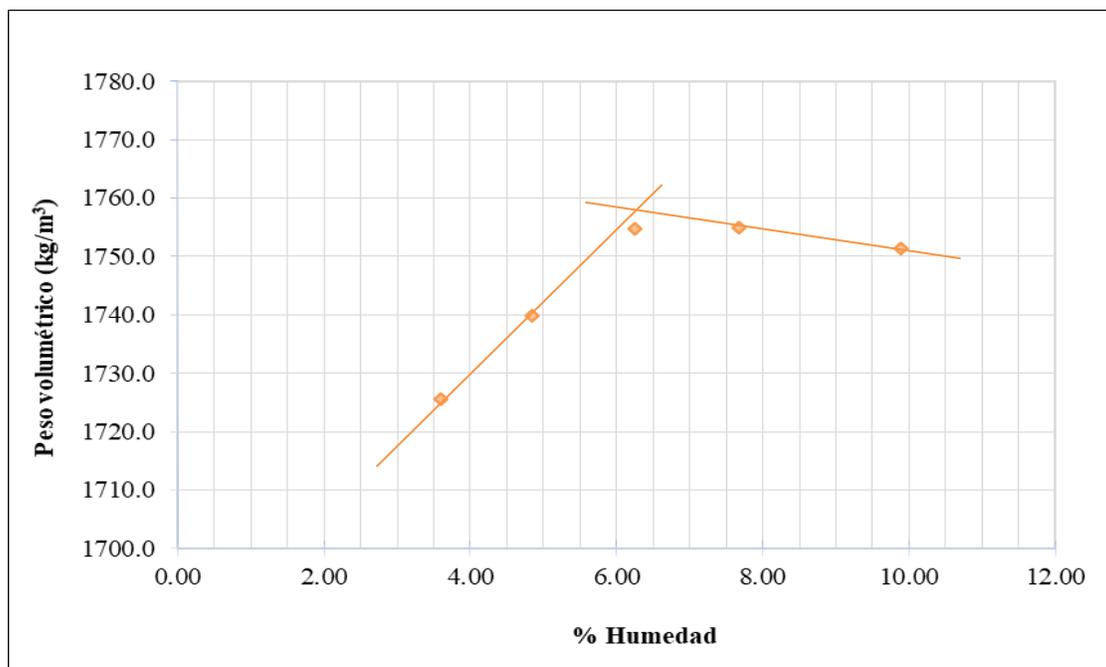


Figura 13. Curva densidad seca máxima vs humedad óptima para el material de base M-1654-19.



- Capacidad de soporte California (AASHTO T 193)

Tabla 7. CBR para el material de base M-1654-19.

No. Golpes	C (%)	%CBR	
		0,1 pulg	0,2 pulg
56	98,2	91,73	111,59
25	94,6	76,02	53,92
10	91,13	12,75	9,39

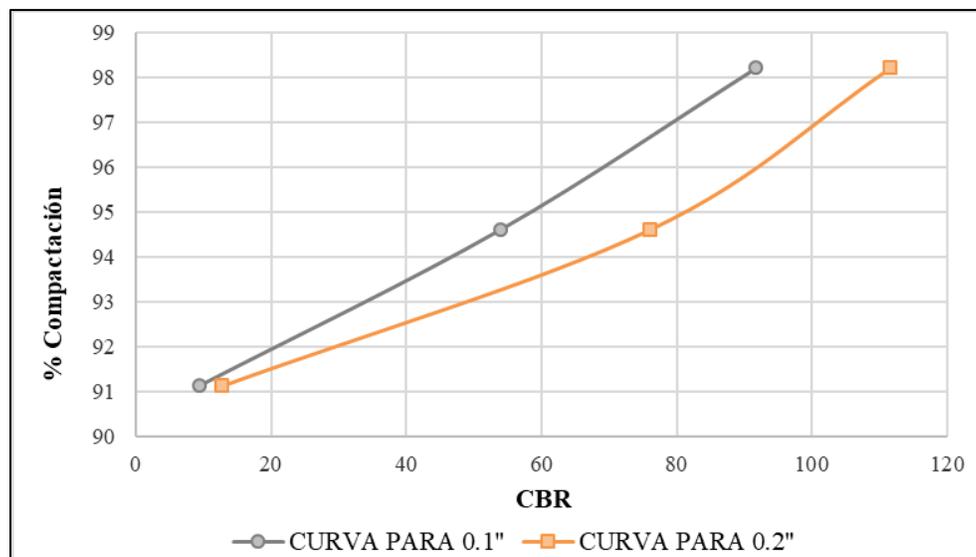


Figura 14. CBR para material de base M-1654-19.



- Módulo resiliente (AASHTO T 307)

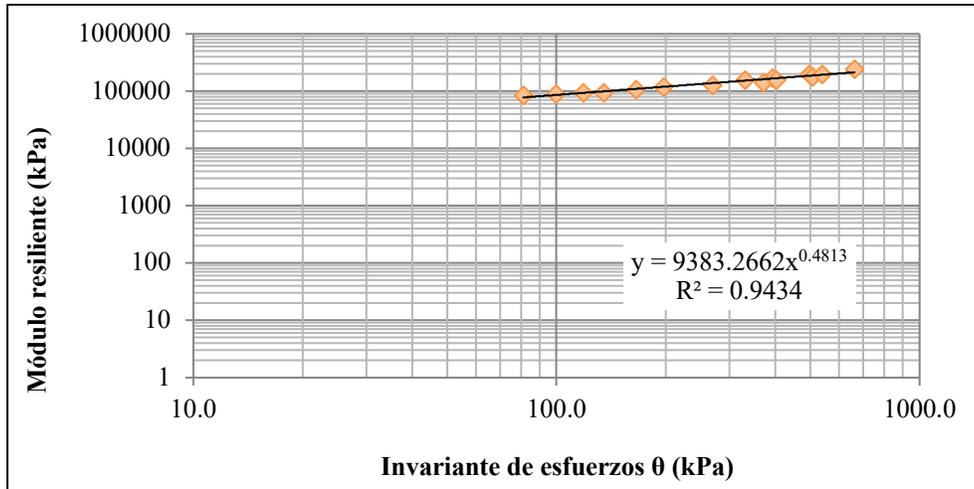


Figura 15. MR 1 para material de base M-1654-19.

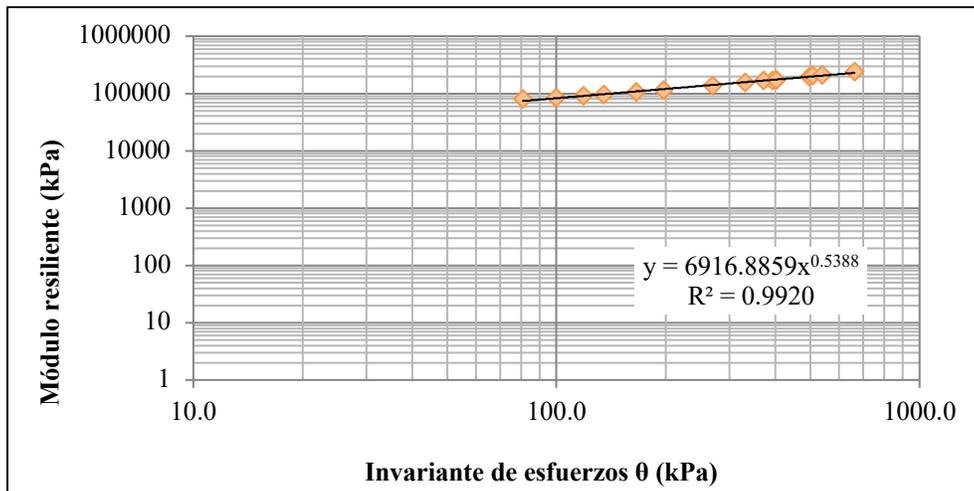


Figura 16. MR 2 para material de base M-1654-19.



Sub base Granular 1 (M 1644-19 Tajo Él Común)

Tabla 8. Resumen de características material de subbase M-1644-19.

Característica	Propiedad del material	Especificación CR2020
Límites de Atterberg	NP	LL:30 máx./LP:7 máx.
Caras fracturadas	100%	50 % mínimo
Abrasión	38%	50 % máximo
Índice durabilidad gruesos	67,7	35 mínimo
Índice durabilidad finos	46,4	35 mínimo

*NP: No Plástico

- Gravedad específica

Tabla 9. Gravedad específica para el material M-1644-19.

Fracción	Gravedad específica			Absorción (%)
	G_s	G_{bs}	G_{bss}	
Gruesos	2,48	1,98	2,18	10,2
Finos	2,42	1,80	2,06	14,1



- Curva granulométrica

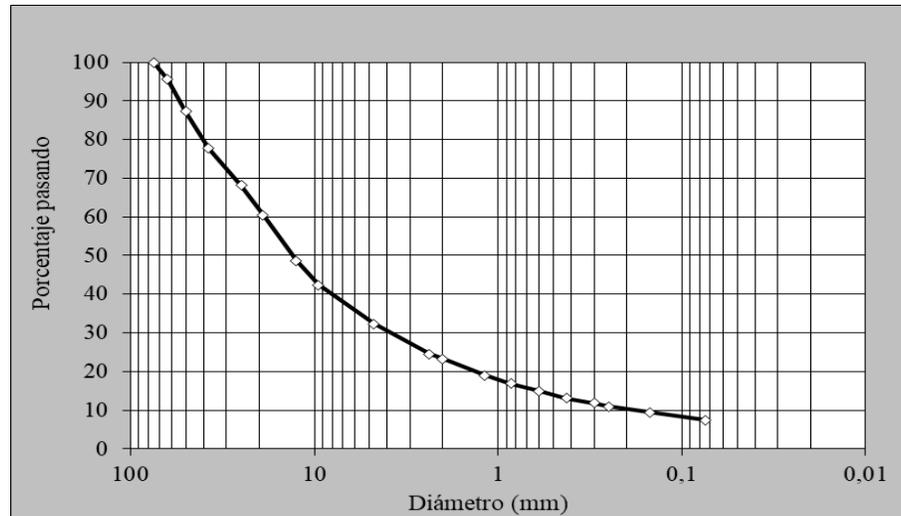


Figura 17. Curva granulométrica Subbase Granular C.

- Proctor modificado (AASHTO T 180)

La densidad máxima seca obtenida para este material es de $1720,0 \text{ kg/m}^3$ y la humedad óptima es de $16,70\%$, tal como se lee de la **Figura 18**.

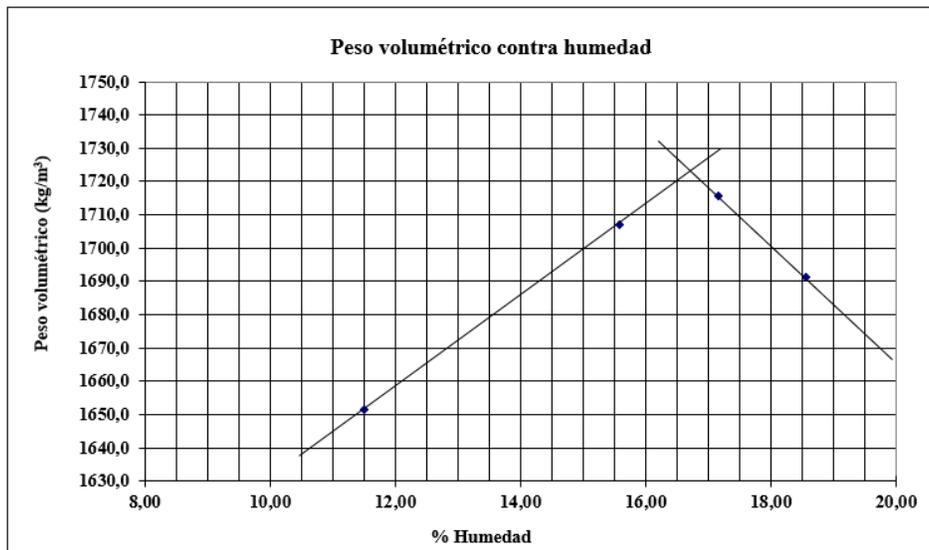


Figura 18. Curva densidad seca máxima vs humedad óptima para el material M-1644-19.

4.3 Diseño original de la mezcla asfáltica

El diseño de mezcla fue realizado por una empresa externa a la Universidad de Costa Rica, la misma que se encargó de los trabajos de producción, colocación y compactación de cada uno de los tramos experimentales. El diseño fue realizado por medio de la metodología Marshall, asimismo, el LanammeUCR posteriormente realizó un proceso completo de verificación de diseño de mezcla. El diseño de mezcla completo de muestra en el **Anexo 4**.

4.3.1 Granulometría y gravedad específica de los agregados

Agregado Fino diseño original: Polvo Piedra

El agregado fino utilizado en la producción de la mezcla presenta las siguientes características granulométricas (**Tabla 10**). Los análisis fueron realizados por medio de las metodologías de ensayo contempladas en las normas AASHTO T27 y AASHTO T11.



Tabla 10. Granulometría para el agregado fino: Polvo Piedra.

Tamiz	% Pasando
Tamiz 9,5 mm (3/8")	100
Tamiz No. 4	83
Tamiz No. 8	56
Tamiz No. 16	35
Tamiz No. 30	24
Tamiz No. 50	19
Tamiz No. 200	8,2

Fuente: INF-0201-2019

La gravedad específica y absorción para el agregado fino (según la norma AASHTO T84), se presentan en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Gravedad específica y absorción para el agregado fino: Polvo Piedra

Gravedad específica bruta seca	2,617
Gravedad específica de superficie saturada seca	2,560
% de absorción	3,40

Fuente: INF-0201-2019



Agregado Grueso: Piedra Quintilla

El agregado grueso utilizado en la producción de la mezcla presenta las características granulométricas mostradas en la **Tabla 12**, según las normas AASHTO T27 y AASHTO T11.

Tabla 12. *Granulometría para el agregado grueso: Piedra Quintilla.*

Tamiz	% Pasando
Tamiz 19 mm (3/4")	100
Tamiz 12,5 mm (1/2")	88
Tamiz 9,5 mm (3/8")	56
Tamiz No. 4	7
Tamiz No. 8	2
Tamiz No. 16	1
Tamiz No. 30	1
Tamiz No. 50	1
Tamiz No. 200	1

Fuente: INF-0201-2019

Las propiedades de gravedad específica y absorción para el agregado fino (según la norma AASHTO T85), se presentan en la **Tabla 13**.

Tabla 13. *Gravedad específica y absorción para el agregado grueso: Piedra Quintilla*

Gravedad específica bruta seca	2,617
Gravedad específica de superficie saturada seca	2,676
% de absorción	2,40

Fuente: INF-0201-2019



4.3.2 Granulometría de la combinación de agregados

Para el diseño de mezcla original, los agregados fueron mezclados en las siguientes proporciones:

- 38% de agregado grueso.
- 62% de agregado fino.

Con las proporciones anteriores, se obtiene la granulometría mostrada en la *Tabla 14* para el diseño de la mezcla.

Tabla 14. Granulometría para la combinación de agregados del diseño de mezcla.

Tamiz	% Pasando	Tolerancias y Especificaciones	
		para Tamaño Máximo Nominal de 12,7 mm	Rangos para la fórmula de trabajo
19,0 mm	100	100	100
12,7 mm	95	90 - 100 (± 5)	90 - 100
9,50 mm	83	70 - 90 (± 5)	78 - 88
N° 4	54	45 - 65 (± 4)	50 - 58
N° 8	35	28 - 39 (± 4)	31 - 39
N° 16	22	16 - 26 (± 4)	18 - 26
N° 30	15	9 - 19 (± 4)	11 - 19
N° 50	12	5 - 16 (± 4)	8 - 16
N° 200	5,5	2 - 8 (± 2)	3,5 - 7,5

Fuente: INF-0201-2019

La curva granulométrica para esta combinación de agregados se observa en la **Figura 19**.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 49 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------

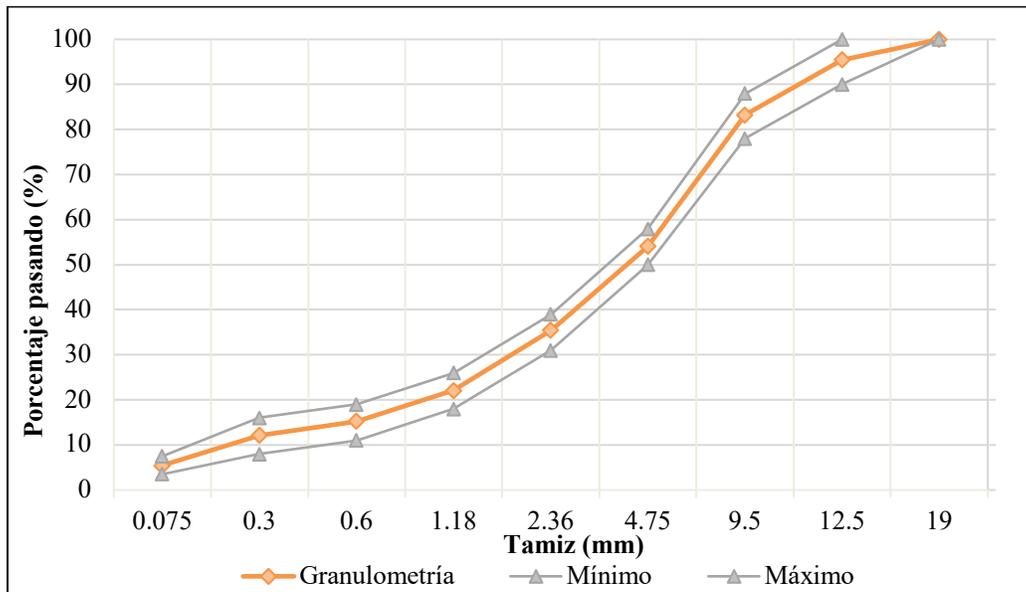


Figura 19. Curva granulométrica para el diseño de mezcla.

4.3.3 Propiedades volumétricas Marshall

A continuación, en la **Tabla 15**, se presentan las propiedades volumétricas Marshall de la mezcla diseñada y utilizada para la construcción de los tramos experimentales del HVS, según diseño original para un 6,1% de asfalto PTM.

Tabla 15. Propiedades volumétricas Marshall de la mezcla.

Parámetros Marshall	Valor	Especificación
Gravedad específica bruta	2,359	-
Gravedad máxima teórica	2,458	-
% Vacíos	4,1	3,0 % - 5,0%



Parámetros Marshall	Valor	Especificación
% VMA	15	14 % mínimo
% VFA	73	65% - 78%
Relación Polvo / Asfalto	1,0	0,6 - 1,3
Estabilidad (kg)	1653	Mín. 800 kg
Flujo (1/100 cm)	33,0	20-35

Fuente: INF-0201-2019

El diseño de mezcla asfáltica detallado se muestra en el Anexo 4.

4.4 Verificación del diseño de mezcla

A continuación, se describen las propiedades del diseño de la mezcla asfáltica en caliente que fue utilizada para la construcción de los tramos experimentales para el Simulador de Vehículos Pesados. Los datos mostrados en esta sección fueron brindados por el proveedor de servicios de producción de la mezcla asfáltica, bajo sus propios controles de calidad previo a la producción. El LanammeUCR tomó las muestras necesarias para realizar la caracterización de todos los materiales y se estarán presentando en un siguiente informe.

En esta sección se presentan las características físicas de los agregados minerales y las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente (utilizada para la construcción de los tramos experimentales) que fueron determinadas por el Contratista como parte de su plan de autocontrol de calidad durante la producción y colocación de la mezcla bituminosa. El LanammeUCR efectuó una verificación de la calidad estos materiales a través de la recolección y análisis de muestras en laboratorio. Esta verificación se presentará más adelante.

Adicionalmente se presentan las propiedades volumétricas de una muestra de mezcla asfáltica en caliente que fue obtenida por el LanammeUCR a través de la reproducción a

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 51 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



escala de laboratorio del diseño desarrollado por el proveedor de la mezcla bituminosa. Previo al diseño de la mezcla bituminosa, se efectuó una caracterización completa de los agregados minerales y del ligante asfáltico propuesto y utilizado en el experimento, sin embargo, se detectaron diferencias entre la verificación y el diseño original de planta, lo cual es abordado en las secciones siguientes.

4.4.1 Granulometría y gravedad específica de los agregados

Agregado Fino: M-1642-2019

La muestra de agregado fino utilizado para replicar en laboratorio la mezcla asfáltica producida por el proveedor presenta las siguientes características granulométricas (**Tabla 16**), según las normas AASHTO T27 y AASHTO T11 o ASTM C127 y ASTM C136. Las propiedades de gravedad específica y absorción para el agregado fino (según la norma AASHTO T84), se presentan en la **Tabla 17**.

Tabla 16. Granulometría para el agregado fino: M-1642-2019.

Tamiz	% Pasando
Tamiz 9,5 mm (3/8")	100
Tamiz No. 4	91
Tamiz No. 8	68
Tamiz No. 16	49
Tamiz No. 30	35
Tamiz No. 50	24
Tamiz No. 200	10

Fuente: INF-0911-2021



Tabla 17. Gravedad específica y absorción para el agregado fino: M-1745-2021.

Gravedad específica bruta seca	2,62
Gravedad específica de superficie saturada seca	2,67
% de absorción	2,0 %

Fuente: EIC-Lanamme-INF-0108-2021

Agregado Grueso: M-1643-2019

La muestra de agregado grueso utilizado para replicar en laboratorio la mezcla asfáltica producida para el proyecto, presenta las características granulométricas en la **Tabla 18**, según las normas AASHTO T27 y AASHTO T11 o ASTM C127 y ASTM C136.

Tabla 18. Granulometría para el agregado grueso: M-1643-2019.

Tamiz	% Pasando
Tamiz 19 mm (3/4")	100
Tamiz 12,5 mm (1/2")	87
Tamiz 9,5 mm (3/8")	54
Tamiz No. 4	10
Tamiz No. 8	4
Tamiz No. 16	2
Tamiz No. 30	2
Tamiz No. 50	2
Tamiz No. 200	1

Fuente: INF-0911-2021

Las propiedades de gravedad específica y absorción para el agregado grueso (según la norma AASHTO T85), se presentan en la **Tabla 19**.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 53 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



Tabla 19. Gravedad específica y absorción para el agregado grueso: M-1643-2019.

Gravedad específica bruta seca	2,64
Gravedad específica de superficie saturada seca	2,69
% de absorción	1,8

Fuente: EIC-Lanamme-INF-0108-2021

Tereftalato de polietileno PET: M-0626-2021

Este material de desecho, utilizado en la producción de la mezcla presenta las siguientes características granulométricas (**Tabla 20**) según las normas ASTM C702 y ASTM C136. Adicionalmente, se calcula el tamaño promedio de partícula, haciendo uso de la norma ASTM D1921 “Método estándar para el tamaño de partícula de materiales plásticos”. La fórmula que se utiliza se muestra a continuación:

$$D_m = \frac{\sum(P_i \cdot D_i)}{100}$$

Donde: D_m = Diámetro promedio de partícula, mm.

P_i = material retenido en la malla, %.

D_i = tamaño promedio de partícula en la malla, mm.



Tabla 20. Granulometría para PET: M-0626-2021.

Tamiz	% Retenido	% Pasando	Tamaño promedio de partícula (mm)
Tamiz 6,3 mm (1/4")	0,0	100	
Tamiz No. 4	7,6	92	
Tamiz No. 8	77	16	
Tamiz No. 16	14	1,8	3,41
Tamiz No. 30	1,4	0,5	
Tamiz No. 50	0,3	0,2	
Tamiz No. 200	0,0	0,0	

Fuente: INF-0559-2021

Las propiedades de gravedad específica para el PET (según la norma ASTM D792), se presentan en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Gravedad específica y densidad para el PET: M-0626-2021.

Densidad a 25 °C (g/cm³)	1,192
Gravedad específica	1,196

Fuente: INF-0914-2021

Se tienen adicionalmente resultados de pruebas realizadas al PET para valoraciones termogravimétricas de descomposición y posterior valoración de detección de gases mediante análisis con un equipo infrarrojo acoplado (TGA-FTIR). Los análisis muestran que la incorporación de estos materiales reciclados es segura para ser incorporada a la mezcla asfáltica a temperaturas inferiores a 300°C. Ya que este mantiene su composición química a esta temperatura. Los resultados en detalle se pueden ver el informe LM-PI-UIIT-104-R3

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 55 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



(Baldi y Aguiar, 2020). Además, no se generan gases orgánicos distintos a los que son típicos al proceso de producción de mezcla asfáltica convencional.

Respecto al material de PEAD, es importante aclarar que no se tienen granulometrías ni distribución de partículas de este, sin embargo, sí se tiene el análisis termogravimétrico acoplado al infrarrojo (TGA-FTIR). El cual muestra que el PEAD mantendrá su composición química a temperaturas inferiores a los 200°C, por lo que se considera que a las temperaturas de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente (menores a 200°C) no habrá descomposición del material y de ocurrir sería despreciable. Además, tampoco se generan gases contaminantes distintos a los que son típicos al proceso de producción de mezcla asfáltica convencional. Los resultados en detalle se pueden ver el informe LM-PI-UIIT-104-R4 (Baldi y Aguiar, 2020). Es importante aclarar que el material utilizando en la modificación de los tramos 017 y 021 (nombrado como PEAD más otros plásticos) se realizó con una mezcla de plásticos de desecho industrial, incluido el PEAD, de los cuales no se tiene un completo detalle de la composición final.

4.4.2 Granulometría de la combinación de agregados para diseño

Para replicar el diseño de mezcla realizado por el Contratista, los agregados descritos en la sección anterior fueron mezclados en las siguientes proporciones:

- 48% de agregado grueso.
- 52% de agregado fino.

Con las proporciones anteriores, se obtiene la granulometría mostrada en la **Tabla 22** para el diseño de la mezcla. Es importante señalar que estas nuevas proporciones buscan ajustarse a la curva de diseño original, y que la razón del cambio es por las variaciones de granulometrías de los agregados individuales.



Tabla 22. Granulometría para la combinación de agregados del diseño de mezcla.

Tamiz	% Pasando		Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máximo Nominal de 12,7 mm
	Diseño replicado	Diseño objetivo	
19,0 mm	100	100	100
12,7 mm	94	95	90 - 100 (± 5)
9,50 mm	78	83	70 - 90 (± 5)
N° 4	52	54	45 - 65 (± 4)
N° 8	37	35	28 - 39 (± 4)
N° 16	26	22	16 - 26 (± 4)
N° 30	19	15	9 - 19 (± 4)
N° 50	13	12	5 - 16 (± 4)
N° 200	5,8	5,5	2 - 8 (± 2)

La curva granulométrica para esta combinación de agregados se observa en la **Figura 20**.

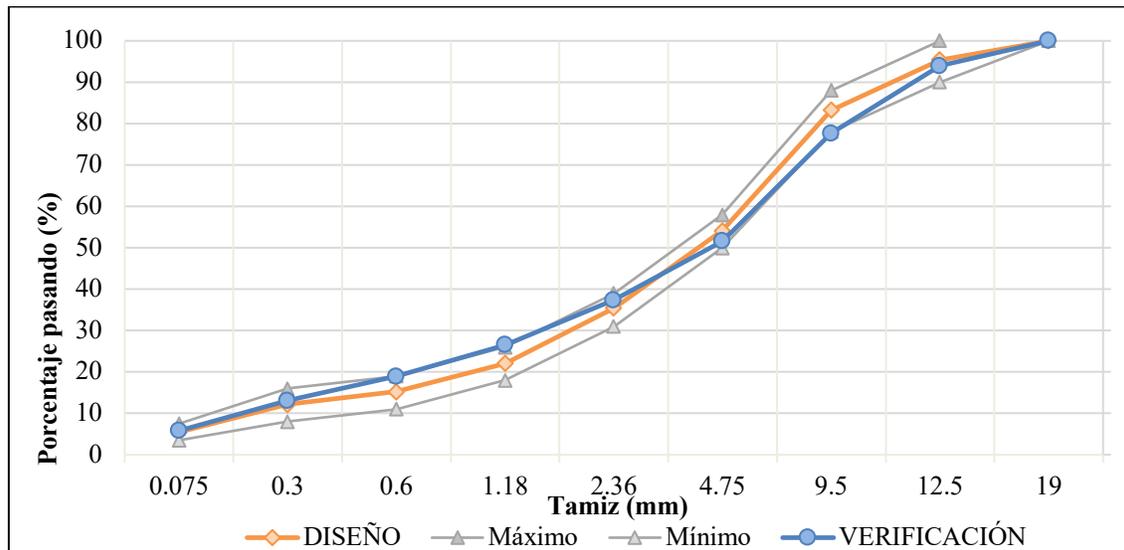


Figura 20. Curva granulométrica para la verificación del diseño de mezcla.

4.4.3 Propiedades volumétricas Marshall réplica del diseño

En la **Tabla 23** se muestran los resultados para la réplica del diseño original, para la mezcla convencional (sin modificante). Con estos resultados se pudo verificar el diseño planteado y materiales utilizados cumplen con especificación (ver **Tabla 23**).

Tabla 23. Volumetría para la escogencia del contenido óptimo de asfalto M-1756-2021, mezcla de control.

Propiedad	Valor		
Gravedad específica agregado G_{bs} (adim)	2,610		
Porcentaje pasando N° 200 (%)	6,1		
Gravedad específica asfalto G_b (adim)	1,032		
Contenido de asfalto (% PTA)	5,93	6,50	7,07
Contenido de asfalto (% PTM)	5,60	6,10	6,60



Propiedad	Valor		
Gravedad específica bruta mezcla G_{bs} (adim)	2,346	2,366	2,376
Gravedad específica máxima teórica G_{mt} (adim)	2,484	2,463	2,449
Contenido de vacíos de aire (%)	5,5	4,0	3,0
Densidad de la mezcla (kg/m^3)	2346,1	2365,6	2376,1
Vacíos en el agregado mineral VMA (%)	15,1	14,9	15,0
Vacíos llenos con asfalto VFA (%)	63,4	73,4	80,1
Polvo/Asfalto (adim)	1,4	1,3	1,2
Estabilidad (kg)	1914	1772	1741
Flujo (1/100 cm)	31,0	29,3	30,3

Fuente: EIC-Lanamme-INF-0364-2021

Tabla 24. Propiedades de diseño Marshall para contenido de asfalto óptimo mezcla M-1756-2021, mezcla de control.

Propiedad de la mezcla	Valor	Especificación
Contenido de asfalto (% PTA)	6,47	-
Contenido de asfalto (% PTM)	6,08	-
Densidad de la mezcla (kg/m^3)	2365,0	-
Contenido de vacíos de aire (%)	4,0	4
Vacíos en el agregado mineral VMA (%)	14,9	Mín. 14
Vacíos llenos con asfalto VFA (%)	73,1	65-75
Polvo/Asfalto (adim)	1,3	0,6-1,3
Estabilidad (kg)	1776	Mín. 800



Propiedad de la mezcla	Valor	Especificación
Flujo (1/100 cm)	29,3	20-35

Fuente: EIC-Lanamme-INF-0364-2021

En la **Tabla 25** se muestran los resultados de los parámetros volumétricos al mantener las dosificaciones del diseño original adicionando el porcentaje de 1% de plástico reciclado a la mezcla en los especímenes de verificación fabricados en el laboratorio. Es evidente que al agregar el material reciclado los parámetros volumétricos sufren un desajuste importante.

Esto podría ser un indicador que bajo las condiciones planteadas podría ser necesario utilizar más asfalto, para mantener los parámetros dentro de especificación, la necesidad de realizar un ajuste y sustitución de material granular en función del plástico adicionado o que se deben de prolongar los tiempos de calentamiento para generar un ablandamiento y mejorar la compactación reduciendo los vacíos. Es importante aclarar que a nivel de laboratorio no se alcanzó el contenido óptimo de asfalto, ya que se obtuvo un 5,2 % de vacíos a 6,6 % de asfalto PTM, estudios posteriores pretenden abordar los hallazgos encontrados a nivel de producción a nivel de laboratorio respecto a planta.

Tabla 25. *Volumetría para la escogencia del contenido óptimo de asfalto M-1758-2021, mezcla modificada con 1% PET.*

Propiedad	Valor		
Gravedad específica agregado G_{bs} (adim)	2,596		
Porcentaje pasando N° 200 (%)	6,1		
Gravedad específica asfalto G_b (adim)	1,032		
Contenido de asfalto (% PTA)	5,93	6,50	7,07
Contenido de asfalto (% PTM)	5,60	6,10	6,60



Propiedad	Valor		
Gravedad específica bruta mezcla G_{bs} (adim)	2,292	2,295	2,307
Gravedad específica máxima teórica G_{mt} (adim)	2,463	2,446	2,434
Contenido de vacíos de aire (%)	7,0	6,2	5,2
Densidad de la mezcla (kg/m^3)	2291,5	2294,7	2307,4
Vacíos en el agregado mineral VMA (%)	16,7	17,0	17,0
Vacíos llenos con asfalto VFA (%)	58,3	63,5	69,4
Polvo/Asfalto (adim)	1,4	1,3	1,2
Estabilidad (kg)	1592	1886	1645
Flujo (1/100 cm)	37,0	45,7	42,3

Fuente: EIC-Lanamme-INF-0364-2021

4.4.4 Propiedades volumétricas Marshall mezcla remodelada de probetas extraídas de los tramos de control

Como complemento a la verificación del diseño a nivel del laboratorio se realizó una verificación de la mezcla colocada. Es importante aclarar que, por motivos de la réplica de algunos ensayos de desempeño y poca disponibilidad de la mezcla muestreada, se tuvo que realizar la verificación a partir de bloques de mezcla colocada, por lo que la granulometría obtenida, podría diferir levemente de la original. Esta información se muestra en la **Tabla 26**.

En contraparte a los resultados obtenidos en las verificaciones en laboratorio, los ensayos realizados con la mezcla de planta presentan vacíos dentro de especificación y acordes con sus contenidos de asfalto por lo que pareciera existe diferencias en la compactibilidad de la mezcla producida en laboratorio respecto a la de planta.



Tabla 26. Propiedades volumétricas de las mezclas extraídas de los tramos evaluados

Variable	Control	Modificada	Modificada
		1%PET	1%PEAD
Contenido de asfalto (% PTM)	5,76	6,08 ¹	5,28 ¹
Contenido de vacíos de aire (%)	4,02	3,49	5,19

Fuente: EIC-Lanamme-INF-0105-2023

Nota: ¹Este contenido de asfalto no contempla el % de plástico adicionado

Tabla 27. Granulometría de las mezclas extraídas de los tramos evaluados.

Tamiz	% Pasando			Rangos para la fórmula de trabajo
	Control	Modificada 1%PET	Modificada 1%PEAD	
25,0 mm	100	100	100	100
19,0 mm	100	100	100	100
12,7 mm	95,05	96,06	96,22	90 - 100
9,50 mm	83,64	85,56	81,27	78 - 88
N° 4	56,12	59,78	53,65	40 - 58
N° 8	36,38	38,70	35,81	31 - 39
N° 16	24,50	26,59	25,44	18 - 26
N° 30	18,29	19,76	19,16	11 - 19



Tamiz	% Pasando			Rangos para la fórmula de trabajo
	Control	Modificada 1%PET	Modificada 1%PEAD	
N° 50	13,36	14,68	14,28	8 - 16
N° 200	7,62	7,85	7,81	3,5 – 7,5

5 Producción de Mezcla y Construcción de los Tramos

5.1 Mezcla asfáltica modificada con plástico reciclado

5.1.1 Dosificaciones de los materiales de desecho

El material de desecho fue dosificado durante la producción de la mezcla asfáltica en la planta. En total se obtuvieron 3 mezclas asfálticas distintas con las siguientes dosificaciones y materiales:

- Mezcla asfáltica convencional sin material de desecho (control).
- Mezcla asfáltica con 1% de plástico PET.
- Mezcla asfáltica con 1% de PEAD y otros plásticos de desecho industrial.

La dosificación de 1% de material de desecho, fue realizada sobre el peso de la mezcla asfáltica y fue agregado como un componente adicional fuera del diseño de mezcla.

5.1.2 Proceso de dosificación en la planta de producción de mezcla asfáltica

En esta sección, se describe el proceso de dosificación del material de desecho en la planta de producción de mezcla asfáltica que fue utilizado para la construcción de los tramos experimentales.



1. El proceso de dosificación de material de desecho se inicia preparando la cantidad de material requerido para cada mezcla que se va a realizar. Para ello, se contabilizó la cantidad de recipientes (baldes) que se necesitaban para obtener el peso requerido para cada bache de producción.



Figura 21. Preparación de la cantidad del material.



2. El material de desecho preparado se transporta a la ubicación designada para ser ingresada en la planta de producción de mezcla. La dosificación se realiza a través de un alimentador especial ubicado luego del proceso de calentamiento de los agregados, para evitar el sobrecalentamiento de los materiales.



Figura 22. Ubicación para añadir el material de desecho a la planta.



3. De forma simultánea, mientras se prepara el material de desecho, la maquinaria del sitio se encarga de recolectar los agregados requeridos para la producción de la mezcla. Este agregado se deposita en las tolvas correspondientes que alimentan a la planta de producción.



Figura 23. Cargadora recolectando los agregados de para la producción de mezcla.



Figura 24. Depósito de los agregados en las tolvas que alimentan la planta.



Figura 25. Tolvas de la planta de producción.

4. El material de desecho se combinará con el agregado seco y el ligante asfáltico en la mezcladora de la planta de bache. La dosificación del agregado se realizó por peso en planta en el punto de incorporación de agregado RAP, para evitar la exposición directa del material de desecho con la llama del tambor mezclador. La planta utilizada para la producción de la mezcla es del tipo híbrido donde el mezclado es realizado como en una planta de bache. De esta forma, el material de desecho queda atrapado entre la matriz agregado – ligante. Y no es sometido a las altas temperaturas por las que pasa el agregado mineral.

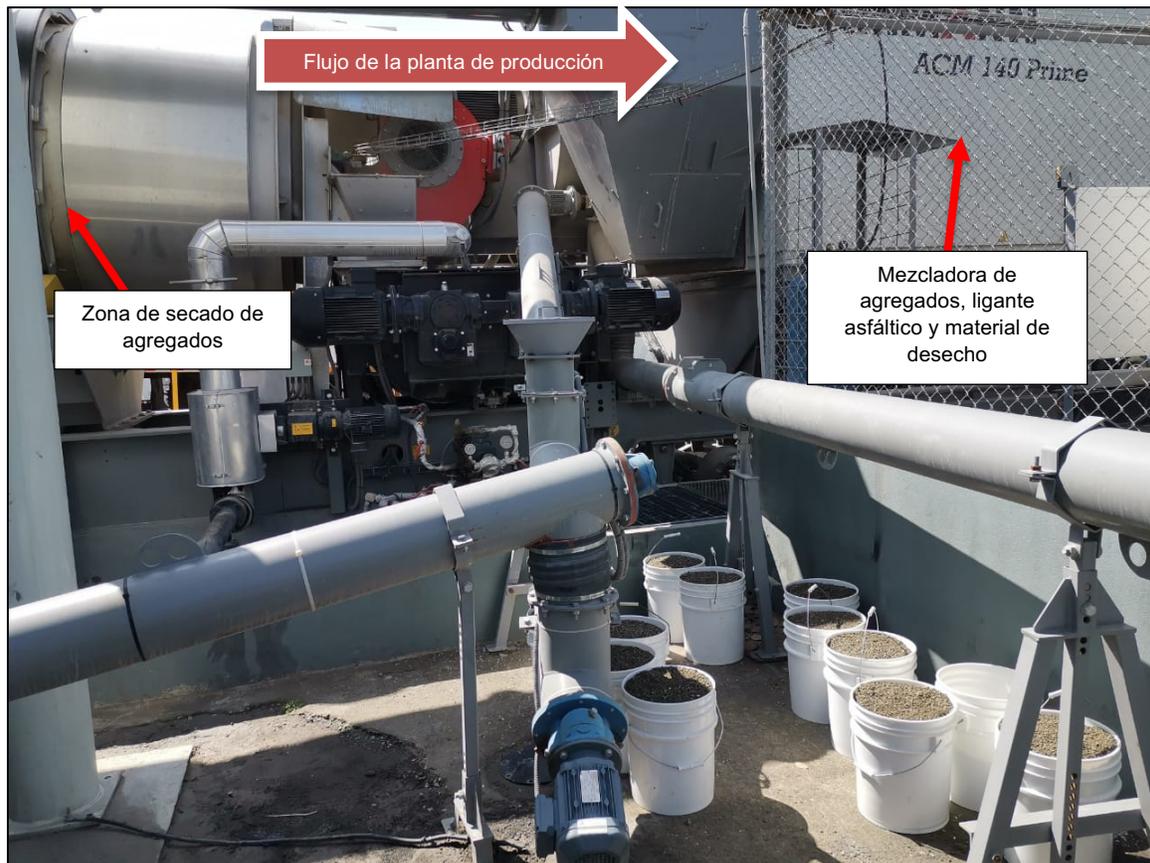


Figura 26. Descripción del proceso de producción de mezcla asfáltica con material de desecho.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 69 de 368
-----------------------------------	----------------	------------------



5. El material de desecho fue ingresado de forma manual a la tubería designada de la planta de producción. Se trató de mantener un ritmo constante para el ingreso del material de desecho, buscando utilizar todos los recipientes del material preparado. Sin embargo, debido a que la dosificación fue de forma manual, es posible que exista cierta heterogeneidad en la distribución del material de reciclado en la mezcla asfáltica.



Figura 27. Dosificación manual del material de desecho.



Figura 28. Ingreso del material en la tubería designada para la planta mezcladora.



- Finalmente, la planta mezcladora descarga la mezcla asfáltica con el material de desecho dentro de su matriz agregado – ligante a una vagoneta que espera en el final del proceso de producción de mezcla.



Figura 29. Salida de la mezcla asfáltica de la planta mezcladora.



5.2 Construcción de los tramos experimentales

En esta sección, se presenta el proceso constructivo que se efectuó para la construcción de la capa bituminosa de los tramos experimentales del HVS. A continuación, se detalla el procedimiento en orden de ejecución.

5.2.1 Proceso constructivo

1. La construcción de los tramos inicia con el riego de imprimación sobre la base granular compactada.



Figura 30. Proceso de riego de liga en la construcción de tramos para el HVS.



Figura 31. Proceso de riego de liga finalizado.



2. Posterior al riego de imprimación se procedió con la colocación y compactación de la mezcla asfáltica en caliente. Previo al de inicio del proceso de colocación, se tomó una muestra de mezcla asfáltica para posteriormente ser caracterizada en el laboratorio, se incluyó un análisis de volumetría y la ejecución de ensayos de desempeño. Todos estos análisis se desarrollaron en el Laboratorio de Mezclas Asfálticas del LanammeUCR.



Figura 32. Muestreo de mezcla asfáltica en las vagonetas.



3. Las cajas con las que se efectuó el muestreo fueron debidamente rotuladas con la información correspondiente al tipo de mezcla que contienen. El procedimiento de ingreso, manipulación, ensayo y disposición final de las muestras se realizó acorde con lo establecido en el sistema de gestión de calidad del LanammeUCR para su adecuada trazabilidad.



Figura 33. Rotulación del tipo de mezcla asfáltica en las cajas.



- Finalizado el muestreo de la mezcla asfáltica (según cada caso, mezcla de control o mezclas modificadas con plástico) se inició con el proceso de colocación con la pavimentadora. Se tuvo especial cuidado con el control del espesor no compacto, para garantizar el espesor de diseño y la compactación especificada luego de la aplicación de la energía de compactación.



Figura 34. Pavimentadora utilizada en la construcción.



Figura 35. Proceso de colocación de mezcla asfáltica con vagoneta y pavimentadora.



Figura 36. Continuación del proceso de colocación de mezcla asfáltica.



5. Durante todo el proceso de colocación de la mezcla se tuvo un estricto control de temperaturas, se incluyó un monitoreo en planta de producción para verificar la temperatura de mezclado y en el sitio de construcción de la carpeta se dio seguimiento a la temperatura de compactación.
6. Posterior al tendido de la mezcla asfáltica con el espesor requerido, se aplicó un ciclo de compactación con vibrado a través de una compactadora de rodillo liso, seguidamente se aplicó un segundo ciclo con este mismo equipo, pero en modo estático, finalmente se completó el tren de compactación con una compactadora de llantas neumáticas. El grado de compactación en el sitio se monitoreó con densímetro nuclear para capas bituminosas delgadas.



Figura 37. Finalización de la colocación de mezcla asfáltica de un tramo experimental.

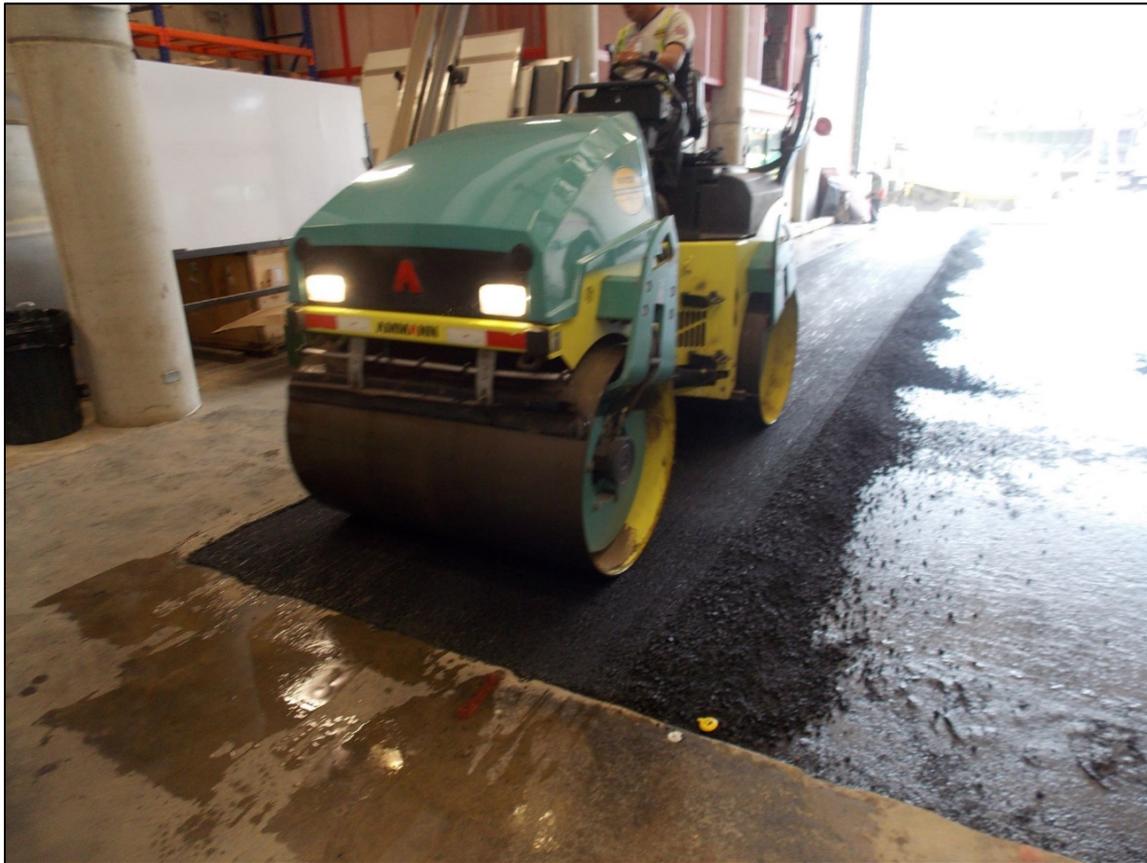


Figura 38. Proceso de compactación de la mezcla asfáltica.



Figura 39. Verificación de porcentaje de vacíos con el densímetro nuclear.



7. Una vez se finaliza el proceso de compactación, se realiza una última verificación con el densímetro nuclear para determinar su porcentaje de vacíos final y verificar su cumplimiento con el valor requerido.

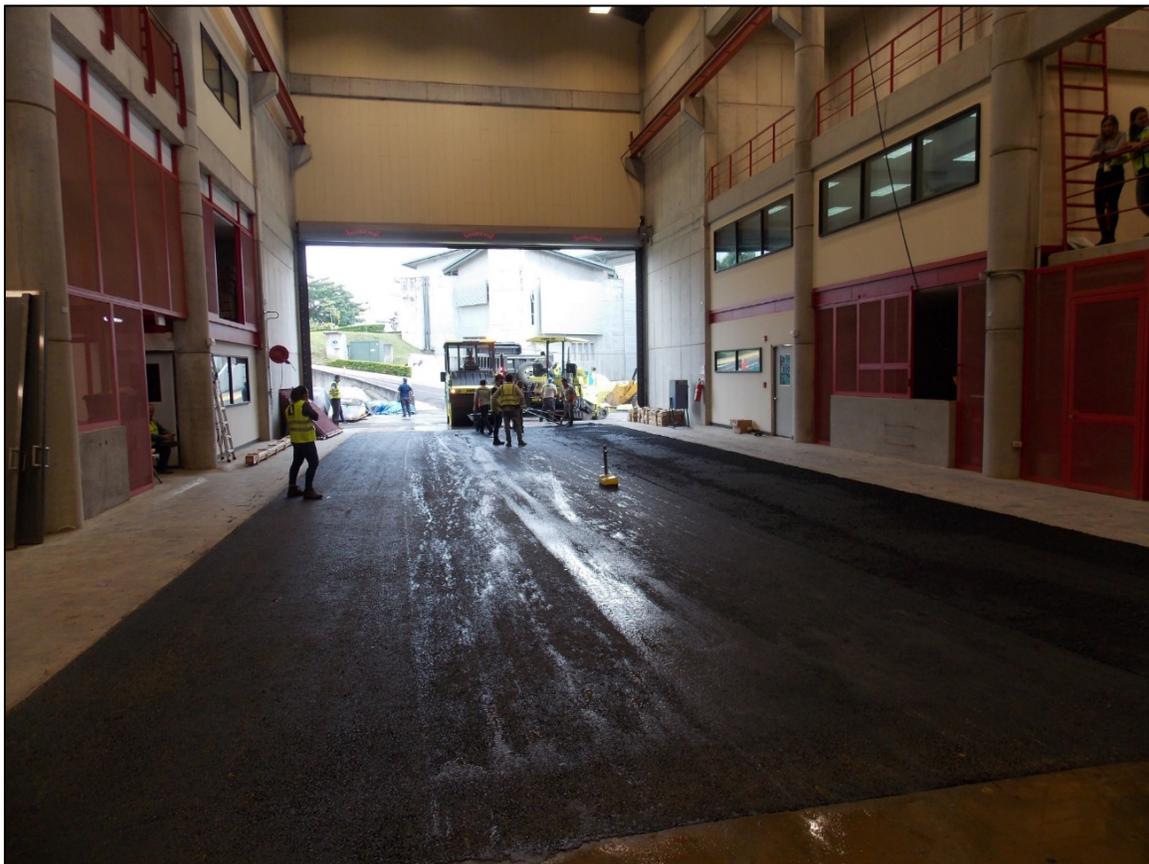


Figura 40. Verificación de vacíos final con el densímetro nuclear.



8. Por último, se le brinda el acabado final al pavimento mediante el uso de un compactador de llanta de hule. Posteriormente, se ejecuta un proceso de sellado de la superficie de rodamiento mediante un ciclo de pasadas con el mismo compactador de llanta de hule.



Figura 41. Proceso de acabo final con el compactador de llanta de hule.



9. Una vez finalizado el proceso constructivo, se procedió a demarcar los tramos experimentales para la realización del ensayo de deflectometría (Falling Weight Deflectometer o FWD).



Figura 42. Demarcación del tramo experimental para el ensayo de FWD.



Figura 43. Ejecución del ensayo de FWD.

5.2.2 Densidades de compactación

En la **Tabla 28** se muestra el grado de compactación en sitio medida durante el proceso constructivo, utilizando el densímetro nuclear.

Tabla 28. Densidades de compactación en sitio.

Tramo	Muestra	% Compactación Promedio
Control	M2079-19 M2083-19	92,20
1% PET	M2080-19 M2084-19	87,20
1% PEAD	M2081-19 M2085-19	88,00



6 Resultados

6.1 Descripción inicial general de los tramos

Previo a la aplicación de las cargas con el HVS, se determinó la capacidad estructural inicial de las pistas experimentales a través de ensayos de deflectometría con Deflectómetro de Impacto (FWD). Con la información generada se estimaron las respuestas de las estructuras de pavimento y su capacidad mecánica mediante los módulos de cada capa, incluyendo el del suelo de apoyo (subrasante).

Se efectuaron 9 mediciones con FWD. La distancia entre cada sitio evaluado es de 1 metro, ver **Figura 44**. En cada uno de los puntos de aplicación de carga se realizó el ensayo de deflectometría a 3 niveles de carga (con 3 repeticiones para cada condición), para un análisis posterior de no linealidad de los materiales (40 kN, 60 kN y 80 kN). Estos niveles de carga también son congruentes con los que serán aplicados posteriormente con el HVS.

Los puntos de evaluación con el FWD se detallan en siguiente figura.

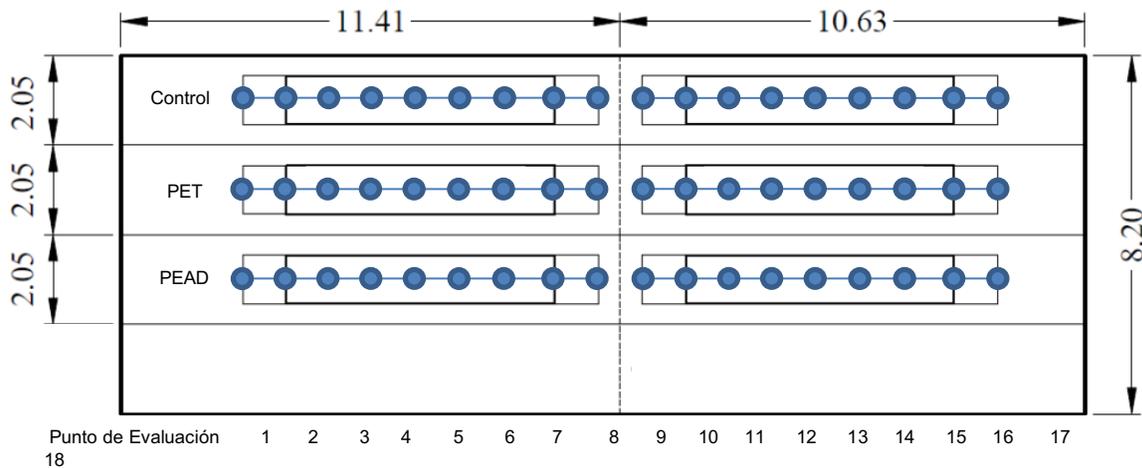


Figura 44. Puntos de evaluación con el FWD.



Los promedios de las deflexiones para cada uno de los tramos de prueba se presentan en las siguientes figuras, estos promedios se graficaron tanto en condiciones iniciales (0 pasadas del HVS) y finales (después de 1 000 000 de pasadas del HVS) del pavimento. De manera general se observa que las deflexiones en promedio se encuentran cercanas a los 800×10^{-3} mm para una carga de 40 kN, en 1100×10^{-3} mm para una carga de 60 kN y en 1400×10^{-3} mm para una carga de 80 kN. Con los valores anteriores se observa un comportamiento aparentemente lineal de la estructura del pavimento. Es importante señalar que no significa que el comportamiento de cada capa individual sea lineal, ya que; el comportamiento de las distintas capas, principalmente las de soporte, podrían presentar no linealidad. Estas condiciones fueron verificadas a lo largo del desarrollo de los ensayos, con base en la caracterización de los distintos materiales a escala de laboratorio y su comportamiento ante las cargas.

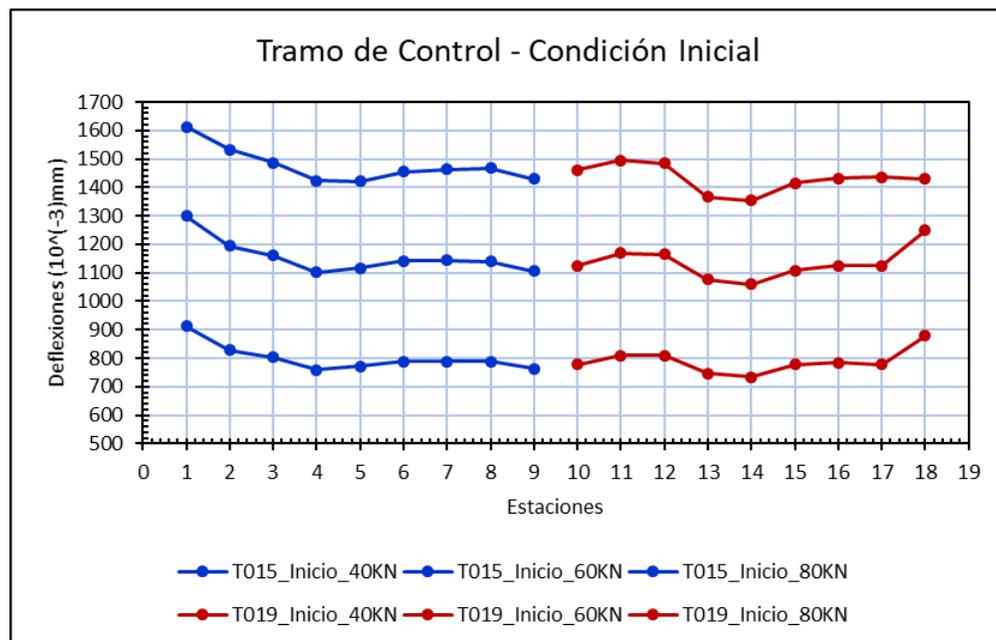


Figura 45. Deflexión D_0 (bajo plato de carga) para tramos de control (Estado: inicial).

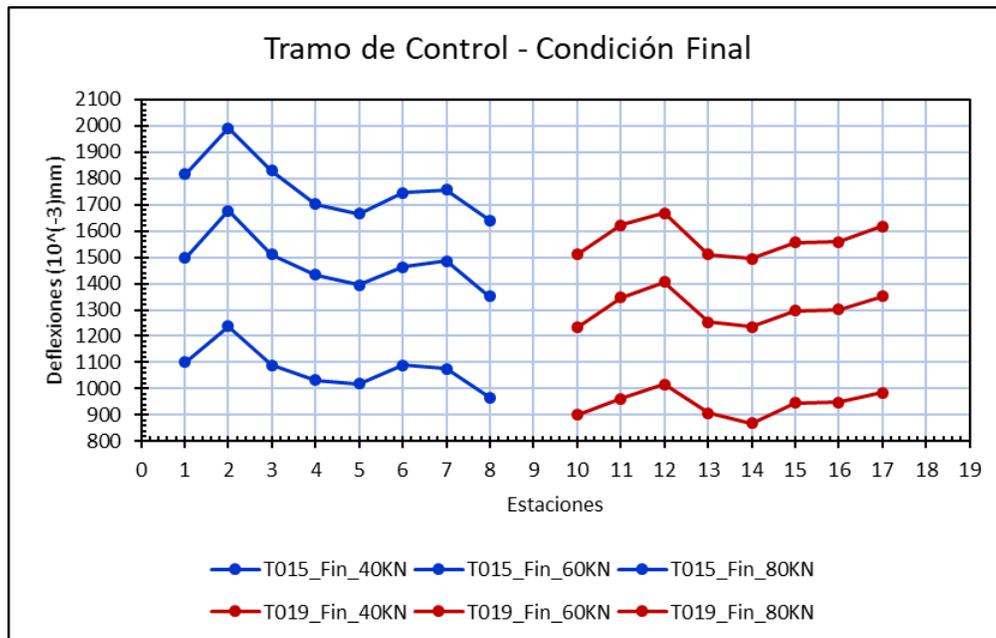


Figura 46. Deflexión D_0 (bajo plato de carga) para tramos de control (Estado: final).

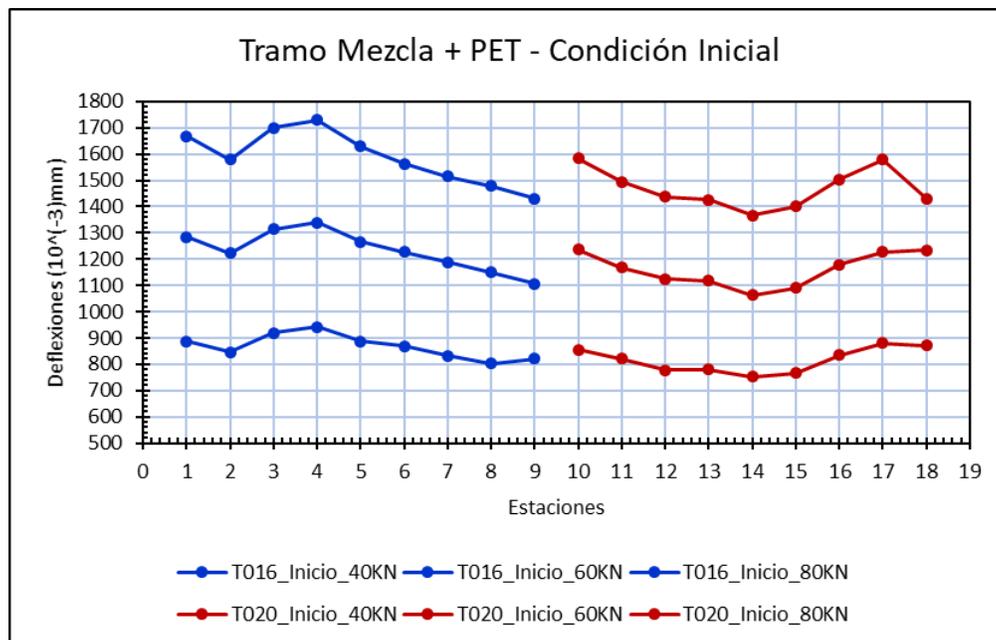


Figura 47. Deflexión D_0 (bajo plato de carga) para tramos modificados con PET (Estado: inicial).

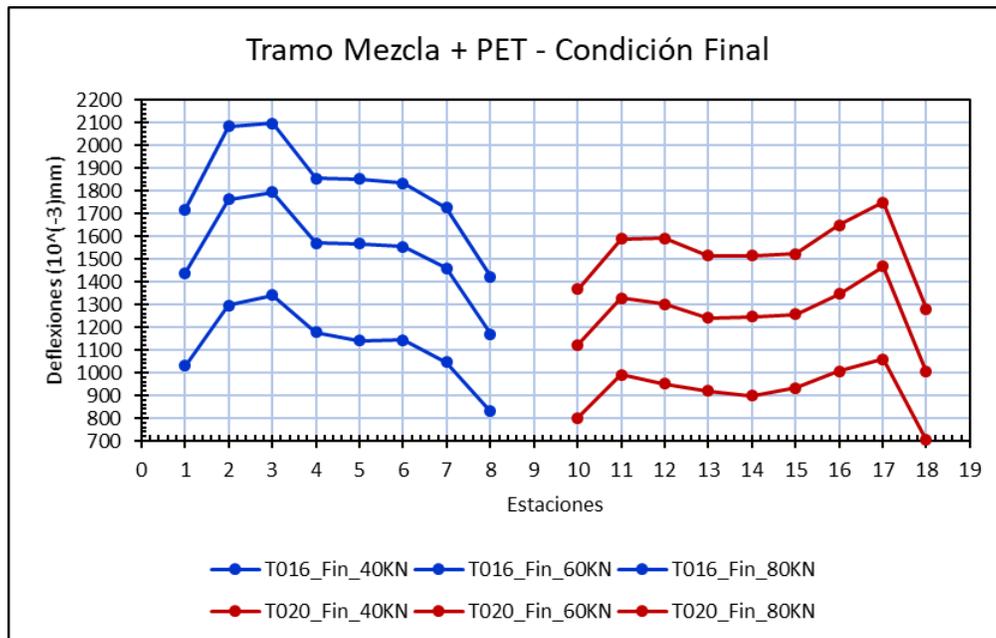


Figura 48. Deflexión D₀ (bajo plato de carga) para tramos modificados con PET (Estado: final).

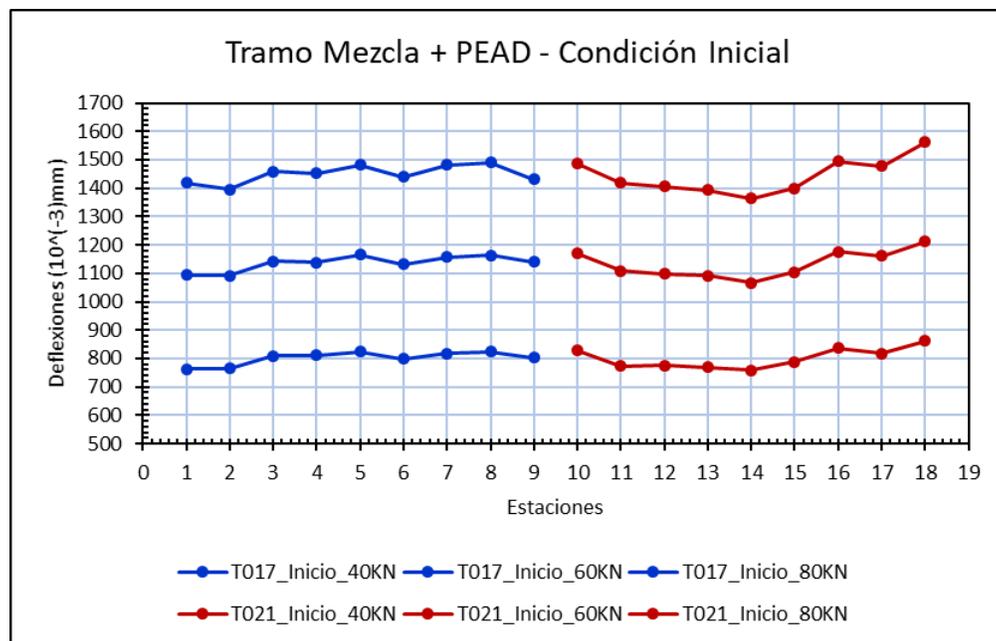


Figura 49. Deflexión D₀ (bajo plato de carga) para tramos modificados con PEAD (Estado: inicial).

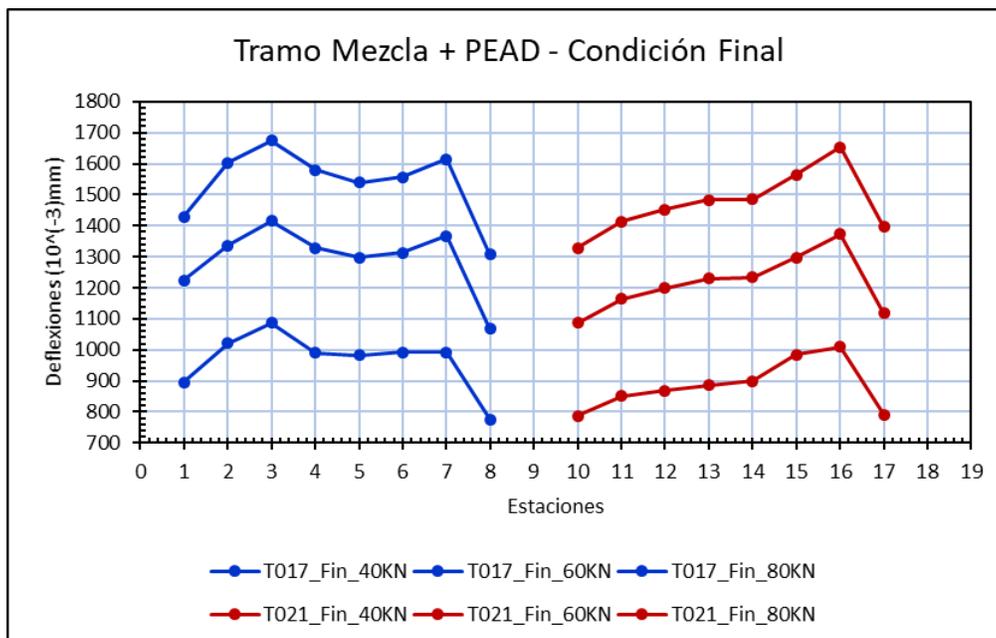


Figura 50. Deflexión D_0 (bajo plato de carga) para tramos modificados con PEAD (Condición: final).

Cabe recordar que el indicador D_0 (deflexión debajo del plato de carga) corresponde a un indicador de la capacidad de toda la estructura del pavimento. En este aspecto y bajo el supuesto que las capas de soporte son relativamente uniformes, mayores deflexiones indican una menor capacidad estructural. Sin embargo, es importante aclarar que siempre pueden existir efectos constructivos en el sitio de los tramos que podrían inducir a variaciones adicionales en lo referente a la capacidad de la estructura, ej. compactación, principalmente en la cercanía de los bordes de la fosa.

Se observa de las figuras anteriores que, en general las mayores deflexiones promedio, para todos los niveles de carga, se pueden asociar a la mezcla asfáltica convencional. Todos los tramos de prueba con mezcla asfáltica modificada con material de desecho muestran una reducción en el D_0 a 40 kN de aproximadamente 4,98% y 3,71% para las mezclas asfálticas modificadas con PET y PEAD respectivamente (es relevante destacar que las mezclas con material reciclado exhiben un menor contenido de asfalto, ejerciendo



una influencia significativa en la rigidez de la mezcla). La mayor reducción la presentan los tramos de prueba con mezcla asfáltica modificada con PET. La tendencia anterior se mantiene para los niveles de carga de 60 kN y 80 kN, con la única diferencia que las reducciones porcentuales de la deflexión respecto a los tramos de control se incrementan.

6.2 Parámetros estructurales de los tramos de estudio

En el informe LM-PI-UMP-083-R1 (2018) se plantea el uso de distintos indicadores de condición estructural que pueden ser estimados a partir de las deflexiones medidas con el FWD. Se destacan estos indicadores pues a diferencias del retrocálculo de módulo, no requiere de información adicional para poder generar una estimación de la capacidad de las capas que conforman la estructura. Los indicadores son empíricos, pero buscan brindar información estructural de las distintas capas de la estructura de forma directa.

Con base en el informe precitado, se han analizado los parámetros estructurales indicados en la siguiente tabla:

Tabla 29. *Parámetros estructurales.*

Nombre	Modelo	Parámetros
Radio de Curvatura (RoC) ¹	$R_0C = \frac{(200)^2}{2d_0 \left(1 - \frac{d_{200}}{d_0}\right)}$	<p>R₀C = Radio de curvatura en metros.</p> <p>d₀ = Deflexión en mm a la distancia 0 desde el centro de aplicación de la carga.</p> <p>d₂₀₀ = Deflexión a 200 mm desde el centro de aplicación de la carga.</p>



Nombre	Modelo	Parámetros
AREA ²	$\text{AREA} = \frac{150(d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{d_0}$	<p>AREA = Parámetro AREA en mm.</p> <p>d₀, d₃₀₀, d₆₀₀, d₉₀₀ = Deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.</p>
<p>AREA Normalizado</p> <p>a³</p> <p>(A_r)</p>	$A_r = \frac{150(d_0 + 2d_{200} + 2d_{600} + d_{900})}{900 * (d_0)^2}$	<p>A_r = relación de AREA normalizada</p> <p>d₀, d₃₀₀, d₆₀₀, d₉₀₀ = Deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.</p>
<p>Índice de capa Base</p> <p>(BLI)⁴</p>	$\text{BLI} = d_0 - d_{300}$	<p>BLI = Índice de capa Base</p> <p>d₀, d₃₀₀ = Deflexiones en mm medidas a la distancia 0 y 300, mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga</p>
<p>Índice de capa</p>		MLI = Índice de capa intermedia



Nombre	Modelo	Parámetros
Intermedi a (MLI) ⁴	$MLI = d_{300} - d_{600}$	d_{300}, d_{600} = Deflexiones en mm medidas a la distancia 300 y 600 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.
Índice de capa Inferior (LLI) ⁴	$LLI = d_{600} - d_{900}$	LLI = Índice de capa Inferior d_{600}, d_{900} = Deflexiones en mm medidas a la distancia 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga

Nota: una descripción más detallada de los indicadores se puede encontrar en el informe LM-PI-UMP-083-R1 (2018).

¹Formula para datos de FWD. Para el modelo de Dehlen (1961) reemplazar el valor de 200 mm por 127 mm.

²Fórmula adaptada de Hoffman, M. (1980).

³Fórmula adaptada de Saleh (2015).

⁴Formula adaptada y actualizada de Horak (2008).

El parámetro ÁREA evalúa las respuestas del pavimento en un radio de hasta 900 mm del punto de aplicación de carga y se estandarizan con respecto a D_0 . Hoffman (1980) afirma que este valor de ÁREA para la mayoría de los pavimentos se encuentra en un rango de 28 cm a 100 cm (11,1 pulgadas a 36 pulgadas). Entre más rígido sea el pavimento, mayor será el valor del parámetro ÁREA, ya que, mide la rigidez relativa de las capas superficiales (mezcla asfáltica) con la de la subrasante. Por tanto, una capa de ruedo rígida o una capa de subrasante de baja capacidad pueden aumentar el indicador (nótese que la subrasante utilizada para soporte de los pavimentos es de baja capacidad de soporte).



El parámetro ÁREA normalizada corresponde a la razón del parámetro ÁREA relativo a una estructura de pavimento con la máxima rigidez teórica alcanzada por dicho parámetro ($900 \text{ mm}^2/\text{mm}$) y la deflexión D_0 que tiene un gran aporte de la capacidad de la subrasante. Por tanto, esta ÁREA normalizada es un parámetro relativo que se puede utilizar para cuantificar variaciones de una misma estructura en el tiempo, o entre estructuras similares.

El Radio de Curvatura (RoC) da una indicación de la condición estructural de las capas de ruedo y base, y presenta poca afectación de las capas inferiores y subrasante. Horak (2008) indica que valores por encima de 100 pueden ser considerados como buenos para estructuras con base granular.

Los indicadores restantes se enfocan en explicar la capacidad de secciones específicas de la estructura. El índice de capa base (BLI) presenta correlaciones con los comportamientos y estados de las capas superficiales, es decir con la superficie de rodadura y capas de base, el Índice de capa intermedia (MLI) se correlaciona de mejor manera con las capas intermedias, es decir con la capa de subbase y el Índice de capa inferior (LLI) se correlaciona con las capas más profundas de la estructura, es decir con capas de materiales seleccionados de relleno y capas de subrasante. (Horak, 2008).

La clasificación del estado de comportamiento de la estructura de pavimento, específicamente compuestos por bases granulares, se realiza por medio de la **Tabla 30**. En principio, esta clasificación se realizaba por medio de los parámetros calculados por medio de la deflexión máxima y de esta forma se clasificaban las condiciones estructurales del pavimento en términos de respuestas elásticas. Actualmente, se muestran rangos del cuenco de deflexiones y la vida remanente del pavimento, empleando los indicadores de Indicador de capa base (BLI), Indicador de capa intermedia (MLI) y el Indicador de capa inferior (LLI). (Horak, 2008).



Tabla 30. Estados de comportamiento para estructuras de pavimento con bases granulares.

Estado de comportamiento	Rango transito ESAL's (millones)	Deflexión Máxima (mm)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)
Muy rígido	12 a 50	< 0,3	< 0,08	< 0,05	< 0,04
Rígido	3 a 8	0,3 a 0,5	0,08 a 0,25	0,05 a 0,15	0,04 a 0,08
Flexible	0,8 a 3	0,5 a 0,75	0,25 a 0,50	0,15 a 0,20	0,08 a 0,10
Muy flexible	< 0,8	> 0,75	> 0,50	> 0,20	> 0,10

En la **Tabla 31** se muestra la clasificación por estado de comportamiento para cada una de las estructuras estudiadas, para cada uno de los análisis se concluye con la clasificación del estado de comportamiento para cada estructura de pavimento y también el rango de tránsito que probablemente vaya a soportar, garantizando un óptimo desempeño e integridad del pavimento.

Tabla 31. Estados de comportamiento para tramos HVS.

Tramo	Estado	Deflexión Máxima (mm)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)
015	Inicio	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Rígido 3-8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
	Fin	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's



Tramo	Estado	Deflexión Máxima (mm)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)
016	Inicio	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
	Fin	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
017	Inicio	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
	Fin	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
019	Inicio	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Rígido 3-8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
	Fin	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
020	Inicio	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
	Fin	Muy flexible	Flexible	Muy flexible	Muy flexible



Tramo	Estado	Deflexión Máxima (mm)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)
		< 0,8 millones ESAL's	0,8-3 millones ESAL's	< 0,8 millones ESAL's	< 0,8 millones ESAL's
021	Inicio	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's
021	Fin	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Flexible 0,8-3 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's	Muy flexible < 0,8 millones ESAL's

Por medio del Benchmarking (BM) o análisis visual comparativo, empleando los parámetros antes descritos, se puede establecer un nivel visual de la condición de la estructura y relacionarlo con su estado de comportamiento o explicar la causa directa de algún tipo de falla, a un nivel preliminar. Este análisis visual por lo general se resume en una codificación de 3 niveles o colores: Verde (Estructura Buena), Amarillo (Estructura Regular) y Rojo (Estructura débil o con daño severo). (Horak, 2008). La **Tabla 32** contiene la descripción de la caracterización o Benchmarking (BM) antes descrita, se encuentra desarrollada para estructuras de pavimento con 3 tipos de capa base y con diferentes intervalos numéricos para cada parámetro analizado.



Tabla 32. Niveles de condición estructural o benchmarking (BM) por medio de parámetros de cuenco de deflexiones.

	Condición estructural	Parámetros de cuenco de deflexiones				
		Do (μm)	RoC (μm)	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Base granular	Buena	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
	Regular	500 - 750	50 - 100	200 - 400	100 - 200	50 - 100
	Débil	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100
Base cementada	Buena	< 200	> 150	< 100	< 50	< 40
	Regular	200 - 400	80 - 150	100 - 300	50 - 100	40 - 80
	Débil	> 400	< 80	> 300	> 100	> 80
Base bituminosa	Buena	< 400	> 250	< 200	< 100	< 50
	Regular	400 - 600	100 - 250	200 - 400	100 - 150	50 - 80
	Débil	> 600	< 100	> 400	> 150	> 80

Nota: Este criterio de evaluación puede ser ajustado para mejorar la sensibilidad de la caracterización.

Fuente: Horak E. (2008)

Los parámetros calculados para los tramos de prueba construidos se presentan en las siguientes tablas, donde a su vez se realiza la estimación y caracterización (benchmarking).



Tabla 33. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos de Control (Inicial).

Tramo de Control	015 - Cond. Inicial			019 - Cond. Inicial		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	502,82		12,49	512,16		8,28
AREA'	0,00070		0,00004	0,00061		0,00004
BLI	243,61		15,20	237,24		18,08
MLI	247,84		17,20	244,29		18,30
LLI	127,79		13,15	124,54		9,33
RoC	147,22		10,14	155,66		13,90

Tabla 34. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos de Control (Final).

Tramo de Control	015 - Cond. Final			019 - Cond. Final		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	470,24		11,23	512,16		8,28
AREA'	0,00049		0,00004	0,00061		0,00004
BLI	389,79		41,44	271,61		23,42
MLI	322,58		23,32	304,51		18,77
LLI	169,46		15,54	164,74		6,32
RoC	92,94		10,77	136,70		12,30



Tabla 35. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos Modificados con PET (Inicial).

Tramo con PET	016 - Cond. Inicial			020 - Cond. Inicial		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	468,74		14,49	483,57		21,04
AREA'	0,00060		0,00004	0,00066		0,00004
BLI	314,33		24,51	276,34		23,81
MLI	271,04		19,42	247,66		15,53
LLI	112,85		11,00	105,48		12,34
RoC	114,28		10,05	125,58		13,38

Tabla 36. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos Modificados con PET (Final).

Tramo con PET	016 - Cond. Final			020 - Cond. Final		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	457,23		21,53	474,46		28,49
AREA'	0,00046		0,00008	0,00059		0,00011
BLI	404,28		68,62	326,56		64,20
MLI	385,01		71,08	302,40		40,57
LLI	153,26		24,13	128,71		12,03
RoC	93,97		22,69	125,81		41,24



Tabla 37. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos Modificados con PEAD (Inicial).

Tramo con PEAD	017 - Cond. Inicial			021 - Cond. Inicial		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	473,45		14,55	486,71		18,04
AREA'	0,00066		0,00004	0,00068		0,00002
BLI	289,80		25,00	266,98		18,62
MLI	250,58		10,67	246,30		14,72
LLI	104,91		6,73	107,53		14,48
RoC	123,99		12,97	131,43		10,15

Tabla 38. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos Modificados con PEAD (Final).

Tramo con PEAD	017 - Cond. Final			021 - Cond. Final		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	455,60		14,21	475,94		20,02
AREA'	0,00053		0,00007	0,00060		0,00007
BLI	355,91		42,90	303,89		42,15
MLI	321,80		43,08	288,83		34,99
LLI	127,24		12,84	122,74		10,89
RoC	100,30		12,60	124,83		18,36



6.3 Mezcla asfáltica de control, sin material de desecho

La mezcla asfáltica de control estudiada cumple con todas las características descritas en los capítulos pasados, esta mezcla asfáltica de control no posee ningún tipo de modificación o inclusión de aditivos o materiales de desecho adicionales al diseño original. Las capas de ruedo de mezcla asfáltica de control fueron construidas en el tramo 015 del HVS, sin ningún tipo de acondicionamiento por temperatura y estudiada a temperatura ambiente, y para el tramo 019 se cuenta con una mezcla asfáltica de control con acondicionamiento por temperatura.

6.3.1 Tramo de control sin acondicionamiento

6.3.1.1 Deflectometría

Para el análisis de deflectometría, se emplearon ensayos de inspección no destructiva (NDT, por sus siglas en inglés). Los análisis fueron realizados por medio de Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) y el Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD, por sus siglas en inglés). A continuación, en la **Figura 51**, **Figura 52**, **Figura 53** y **Figura 54** se muestran cada uno de los cuencos de deflectometría para el tramo sin acondicionamiento (tramo 015) en estado inicial o a cero pasadas del simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) y en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de Esals).

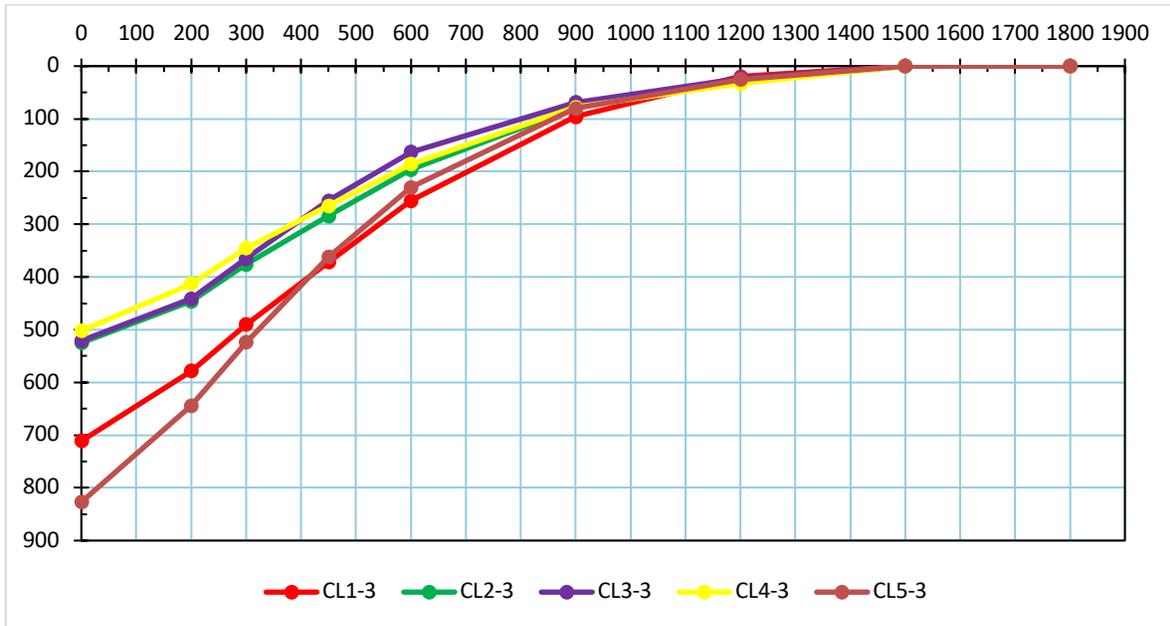


Figura 51. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 015 sin acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

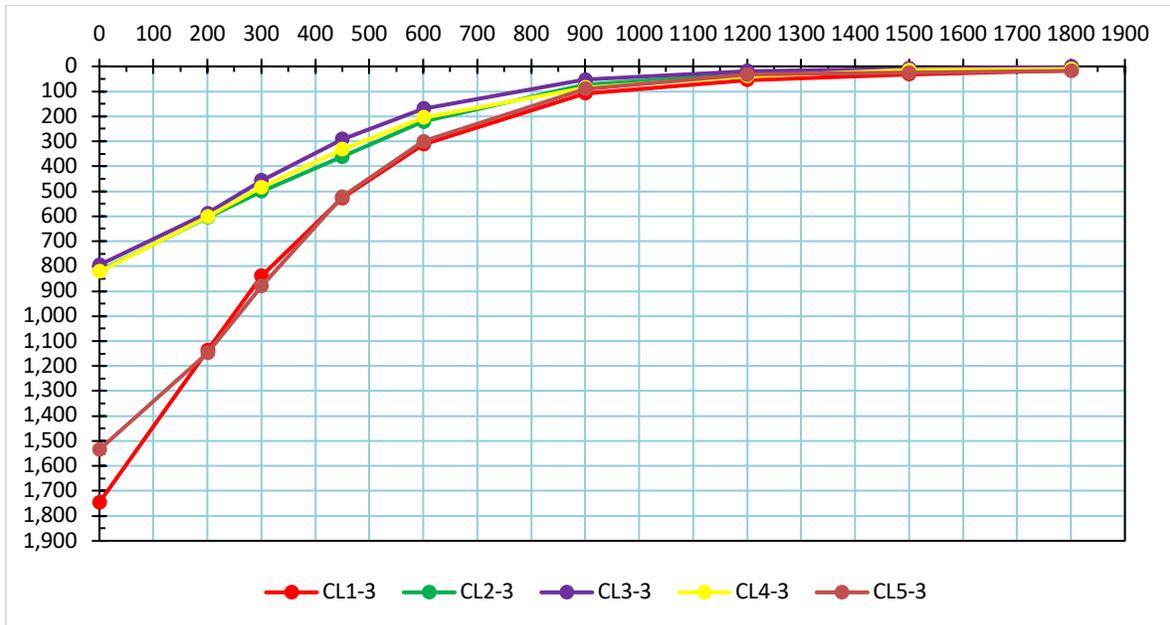


Figura 52. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 015 sin acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

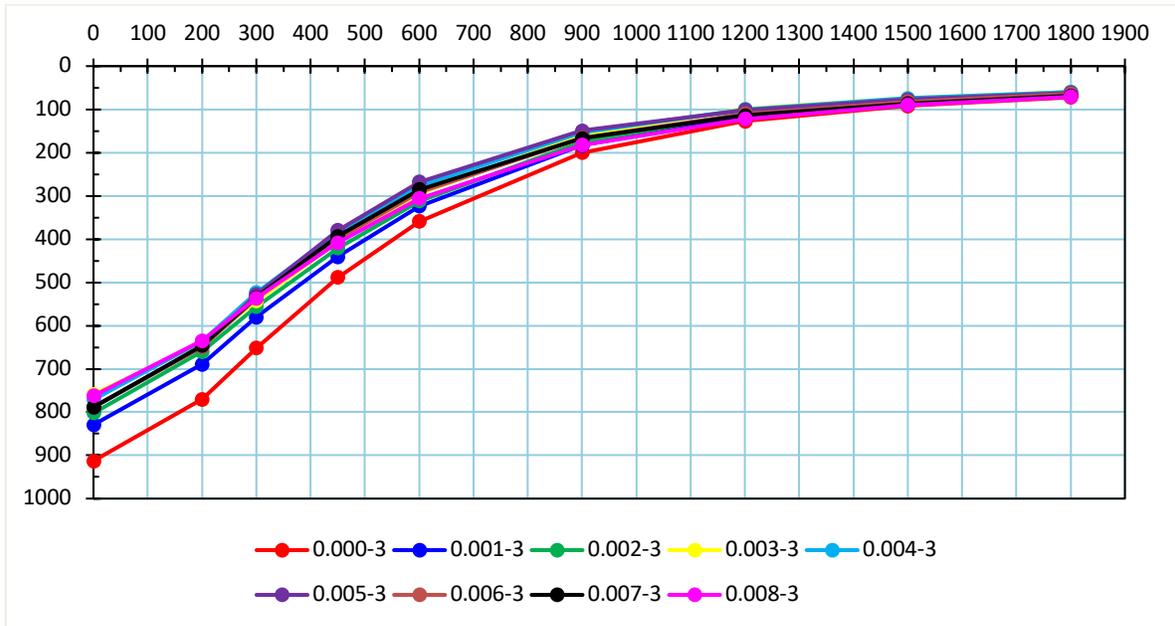


Figura 53. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 015 sin acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

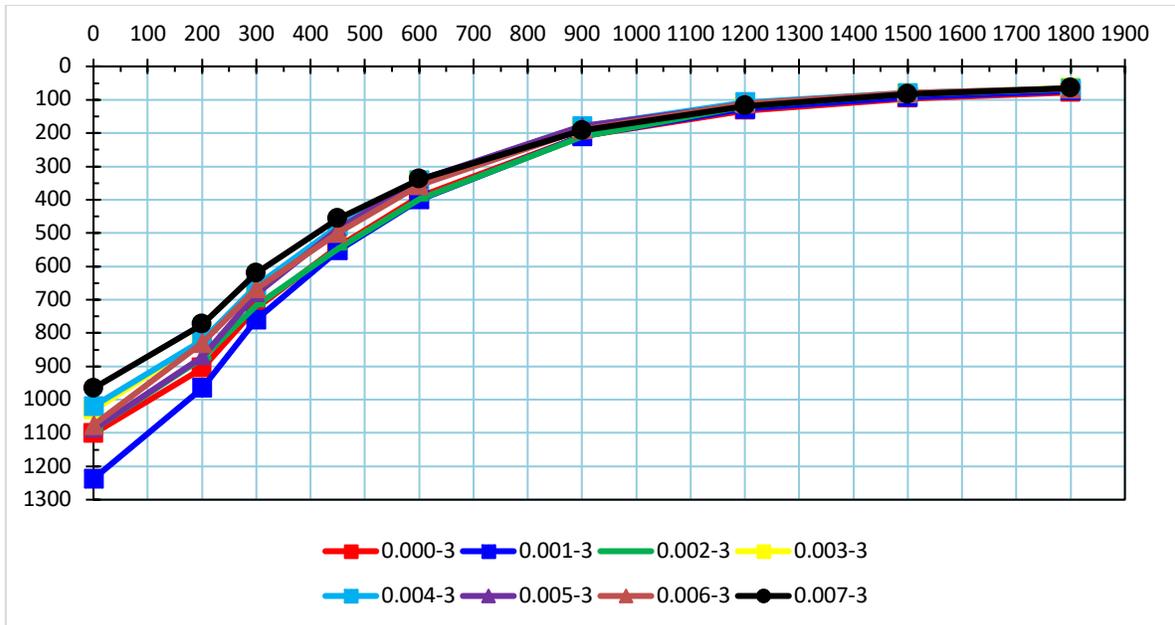


Figura 54. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 015 sin acondicionamiento al millón pasadas de HVS.



Las figuras antes mostradas fueron realizadas con los datos completos para cada una de las metodologías de análisis de deflectometría utilizadas, se observó que la metodología desarrollada por medio del Deflectómetro de superficie de pavimento (RSD, por sus siglas en inglés) se cuentan con respuestas distintas en las estaciones intermedias (CL2, CL3 y CL4) frente a las respuestas para las estaciones externas (CL1 y CL5), debido a la variación en la forma de aplicación y medición de datos RSD entre estos dos grupos.

Dentro de la toma de datos con RSD, para las estaciones externas RSD (CL1 y CL5), la toma de datos se realizó de forma directa y paralela al sentido de aplicación de carga por medio del HVS, para el caso de las estaciones intermedias (CL2, CL3 y CL4) las mediciones fueron inclinadas (no paralelas al sentido de aplicación de carga del HVS), debido a la disponibilidad del espacio de estudio y sobre todo por la configuración propia de espacio y distribución que la metodología necesita.

Por esa razón, antes explicada, es que las deflexiones medidas variaron, entre estaciones externas con mediciones directas y las estaciones intermedias con mediciones inclinadas. Posterior a la obtención de los resultados finales, se trataron de encontrar y calibrar factores de ajuste que puedan corregir los valores inclinados de las estaciones intermedias, donde como conclusión de la revisión se planteó que este proceso debería aún ser investigado más profundamente, debido a su complejidad y dependencia con características de cada tramo. El comportamiento y la descripción antes hecha para los datos de deflectometría en las estaciones intermedias con las mediciones inclinadas, se replicó en las pistas construidas con mezcla asfáltica + PET y mezcla asfáltica + PEAD, incluyendo también las respectivas pistas con acondicionamiento por temperatura para cada uno de los tipos de mezcla asfáltica.

Por esta razón, se realizaron análisis gráficos comparativos para las deflexiones entre cada una de las metodologías empleadas, este proceso se muestra en la **Figura 55**.

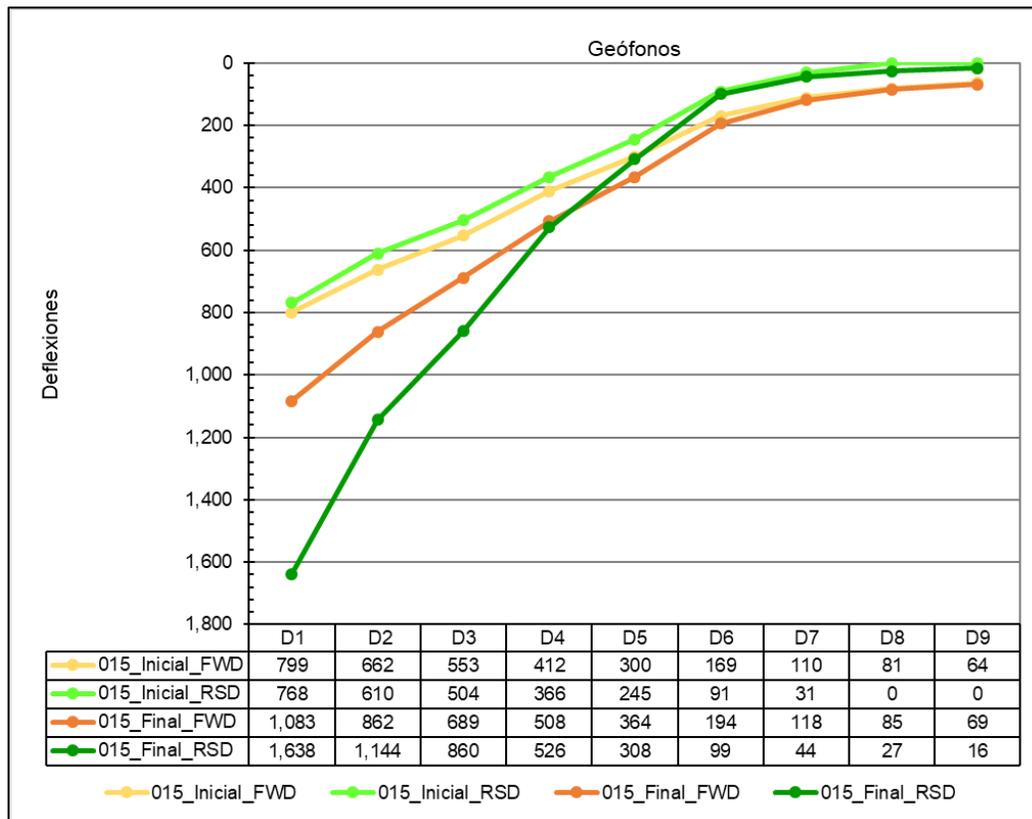


Figura 55. Deflexiones promedio FWD y RSD (CL1 y CL5) para tramo 015 inicial y final.

6.3.1.2 Deformación Permanente

El HVS viene equipado con dos perfilómetros laser para conocer la evolución de la deformación permanente en la superficie del pavimento cada determinado número de ciclos. Por cada escaneo, se levantan 3 200 puntos separados cada 25 mm en sentido transversal y cada 105 mm en sentido del avance de la llanta. Con esto, el ahuellamiento se estima como la diferencia entre los puntos antes de aplicar carga (matriz base) y los puntos tomados después de cada ciclo de carga de interés.

A continuación, en la **Figura 56**, se muestra una vista tridimensional del cuenco de deformaciones, para el tramo de control sin acondicionamiento en su estado final después de un millón de pasadas (3,2 millones de ESAL's) del HVS. Por otra parte, en la **Figura 57**

se muestra el perfil transversal para el mismo tramo en cuestión, según los valores promedio para cada perfil longitudinal (64 perfiles longitudinales generados por el HVS). Por último, en la **Figura 58** se muestra la evolución de la deformación permanente en el tramo de estudio (tramo 015). Es importante mencionar que, para este tramo (tramo 015) se definió como condición inicial un ESAL's de 40 000, debido a algunas inconsistencias en las matrices iniciales.

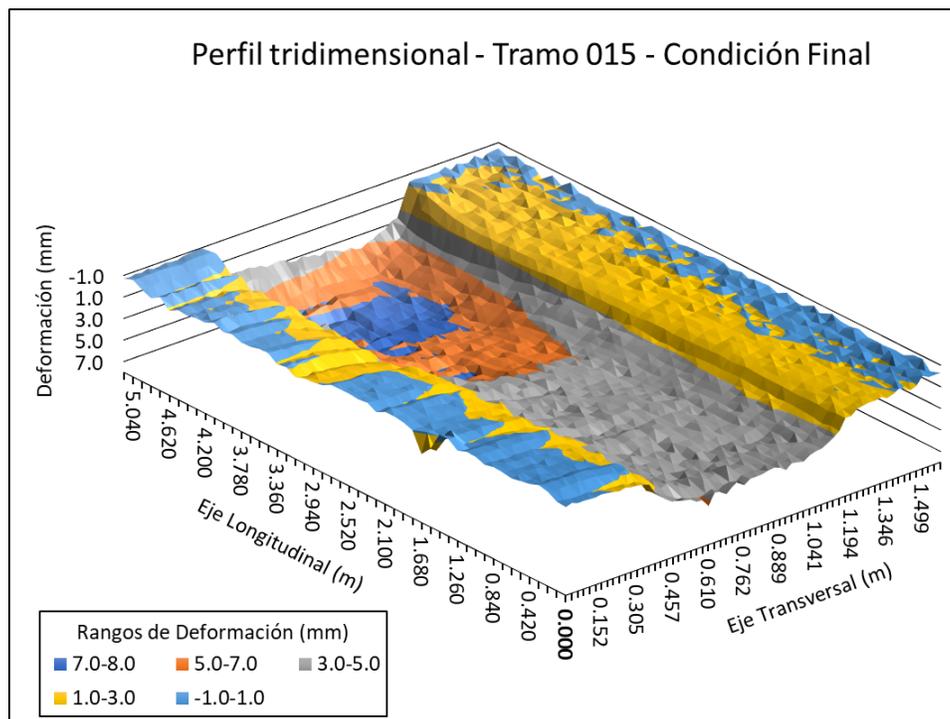


Figura 56. Perfil tridimensional deformado para el tramo 015 final.

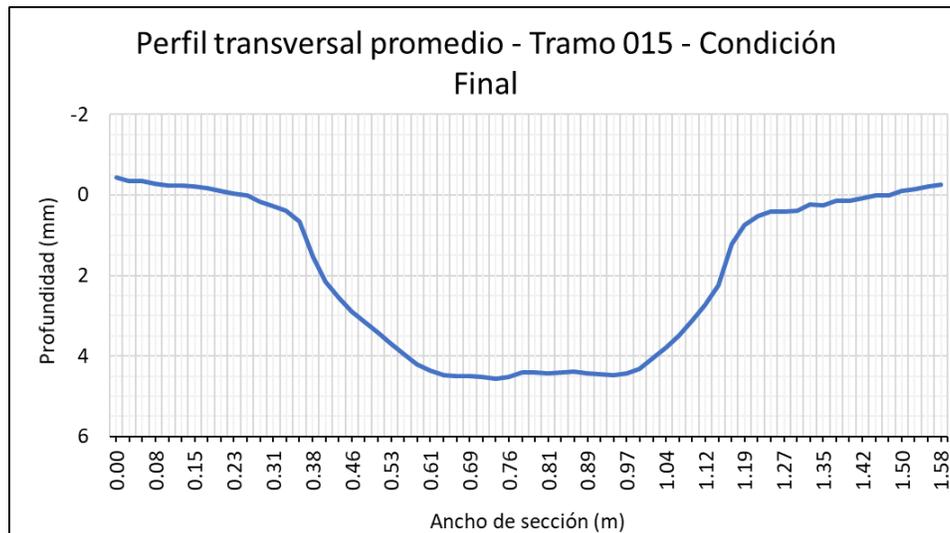


Figura 57. Perfil transversal promedio deformado para el tramo 015 final.

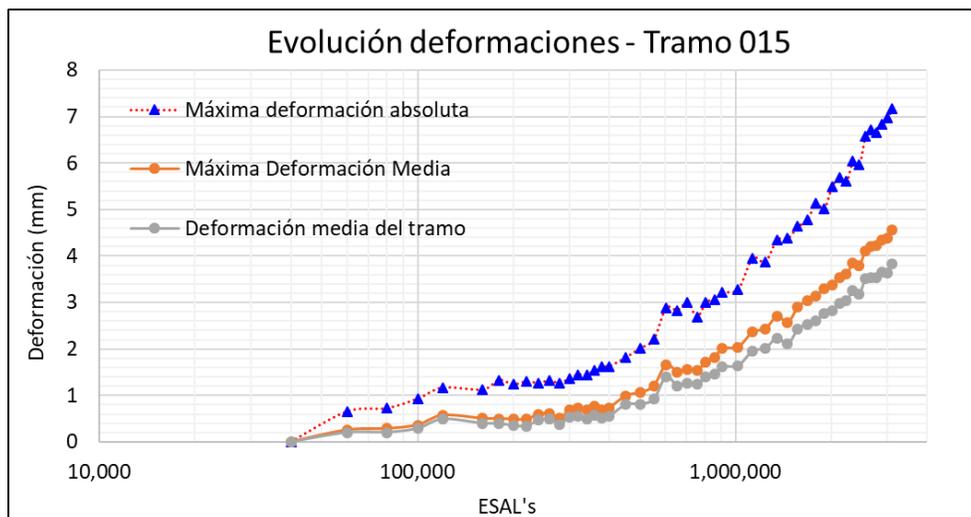


Figura 58. Evolución de las deformaciones para el tramo 015.

Según el perfil tridimensional, mostrado en la **Figura 56**, se aprecia cómo se acumula la mayor deformación permanente en la zona posterior del tramo. En esta se alcanzan deformaciones máximas entre los 7 mm y 8 mm. Así mismo, en el perfil transversal promedio, presentado en la **Figura 57**, se observa como las mayores deformaciones



promedio se ubican en la parte central de la sección a lo largo de todo el ancho de influencia directa de las llantas del HVS, con valores que rondan los 4,5 mm.

Por otra parte, en el caso de la **Figura 58**, se muestran tres diferentes curvas. La curva de máxima deformación absoluta reporta el valor máximo de ahuellamiento en la zona de influencia directa de las llantas, sin importar si este valor se encuentra al inicio, parte intermedia o final del tramo. De forma similar, la máxima deformación media es el valor máximo de ahuellamiento de los valores promedio para cada sección longitudinal. Por último, la deformación media del tramo corresponde al promedio de los valores promedio para las 64 secciones longitudinales que generan los perfilómetros del HVS.

Al cabo de 1 000 000 repeticiones (3,2 millones de ESAL's) (condición final), se logró obtener una máxima deformación absoluta de 7,17 mm, una máxima deformación media (sección transversal) de 4,57 mm y una deformación media del tramo de 3,82 mm. Estas tres curvas de evolución de la deformación muestran esa condición creciente del ahuellamiento según aumenta el número de pasadas; sin embargo, en términos medios, la tendencia del último tercio de las repeticiones posee una tasa de aumento menor respecto a la curva de máximos absolutos, pero con la misma relación entre datos consecutivos.

6.3.1.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

De igual forma que en la deformación permanente, el IRI se calcula a partir de los datos de desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento recolectados por los dos perfilómetros inerciales láser con los que cuenta el HVS (uno en cada extremo de las llantas). Sin embargo; en este caso los datos se procesan en el software PROVAL para obtener la regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal del tramo. A continuación, en la Figura 59, se muestra la evolución del IRI para el tramo 015 (tramo control sin acondicionamiento). Es importante mencionar que solo se consideraron aquellos perfiles longitudinales dentro del área de influencia directa de las llantas (32 de los 64 disponibles, 16 a cada lado del centro del eje de aplicación de carga del HVS).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 110 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

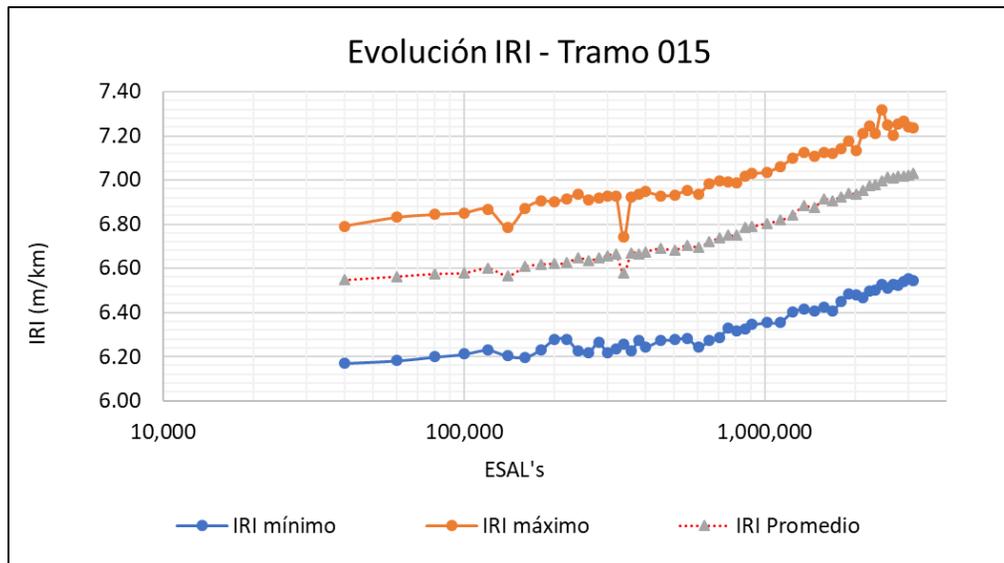


Figura 59. Evolución del Índice de rugosidad internacional para el tramo 015.

Para la condición final del tramo, al cabo de un millón de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) con el HVS, se obtuvieron valores de IRI mayores respecto a su condición inicial. Según se muestra en la figura anterior, se obtuvo para la condición final un IRI de 6,54 como valor mínimo, 7,24 como máximo y 7,03 como valor promedio. En los tres casos, la tendencia de los valores es creciente, donde la diferencia entre el valor final e inicial es de 0,37 para el IRI mínimo, 0,45 para la condición máximo y 0,48 en términos promedio. Se considera importante mencionar que las condiciones de regularidad inicial fueron elevadas, esto debido a la metodología constructiva implementada.

6.3.1.4 Fricción

Para la determinación de la fricción, se realizó el método de prueba estándar del Péndulo Inglés. En la condición inicial del tramo se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona externa adyacente del tramo; sin embargo, para la determinación del valor PTV de fricción (valor del ensayo del péndulo) solo se tomaron en cuenta 12 puntos (correspondientes a la zona interna del tramo en sentido del avance de la llanta).



De esta forma, se obtuvo que el valor inicial (al cabo de 40000 repeticiones con HVS) de fricción es igual a 69. Por otra parte, para la condición final se evaluaron 8 puntos cada 100 cm a lo largo de la zona central del tramo; sin embrago, se tomaron en cuenta los 6 puntos centrales que representan la zona de influencia directa de la llanta del HVS. De esta forma, se obtuvo que el valor final (al cabo de un millón de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) con el HVS) de fricción es igual a 48. En términos generales, se observa una reducción de la fricción en 21 PTV para el tramo control sin acondicionamiento.

6.3.2 Tramo de control con acondicionamiento por temperatura

6.3.2.1 Deflectometría

Los análisis fueron realizados por medio de Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) y el Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD, por sus siglas en inglés). A continuación, en la **Figura 60**, **Figura 61**, **Figura 62** y **Figura 63** se muestran cada uno de los cuencos de deflectometría para el tramo con acondicionamiento por temperatura (tramo 019) en estado inicial o cero pasadas (temperatura superficial del pavimento 21°C) del simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) y en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (temperatura superficial del pavimento 27,3°C).

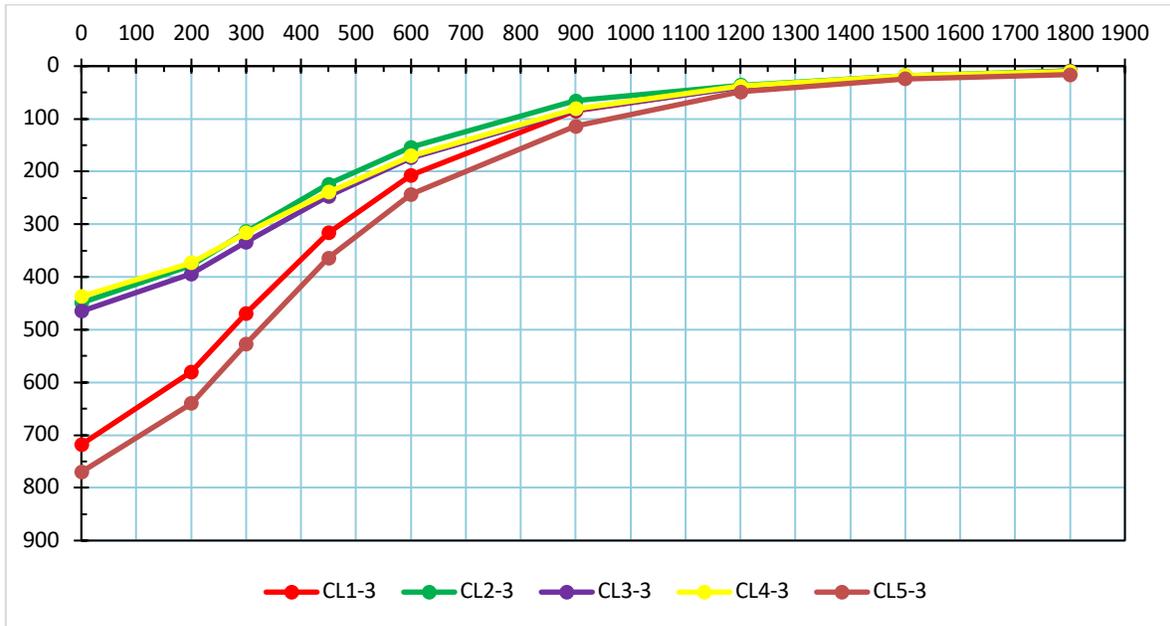


Figura 60. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 019 con acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

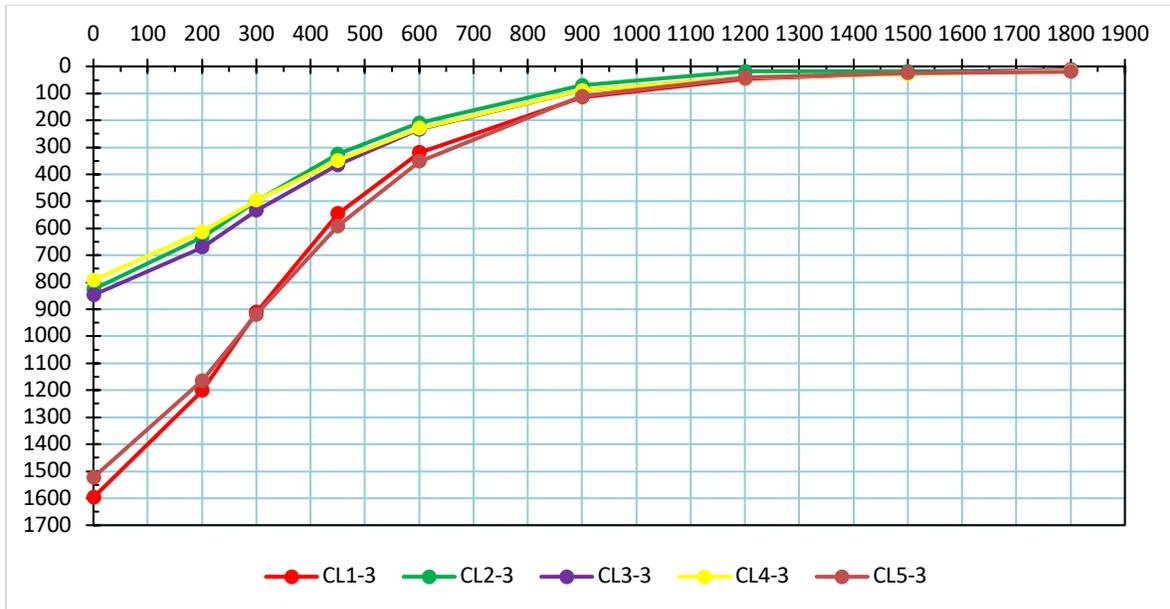


Figura 61. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 019 con acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

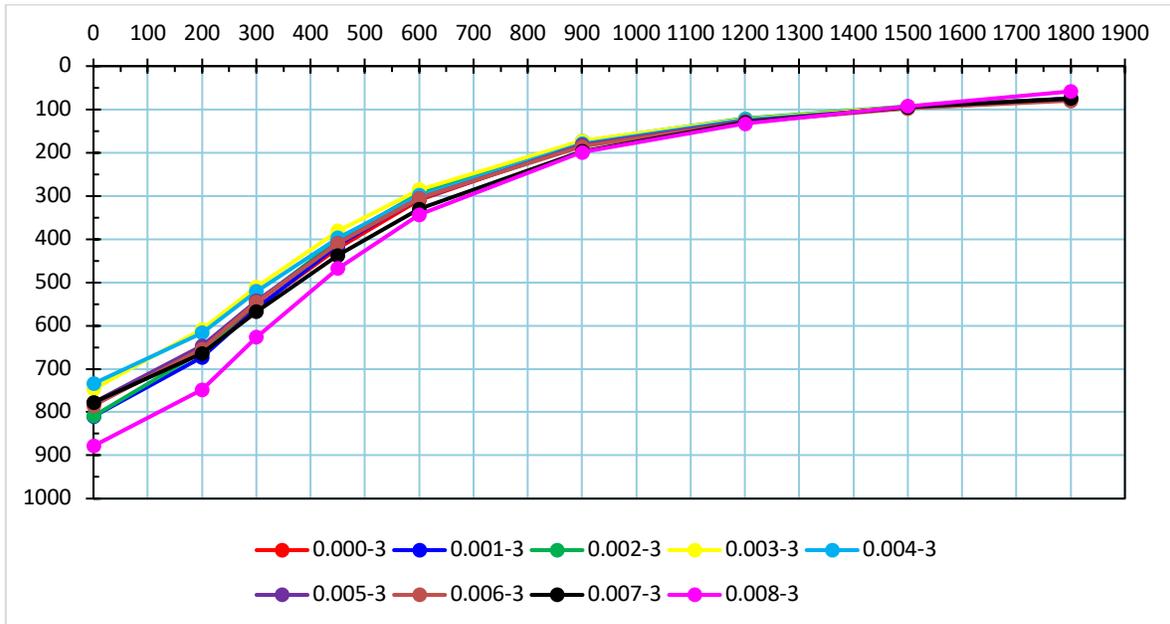


Figura 62. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 019 con acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

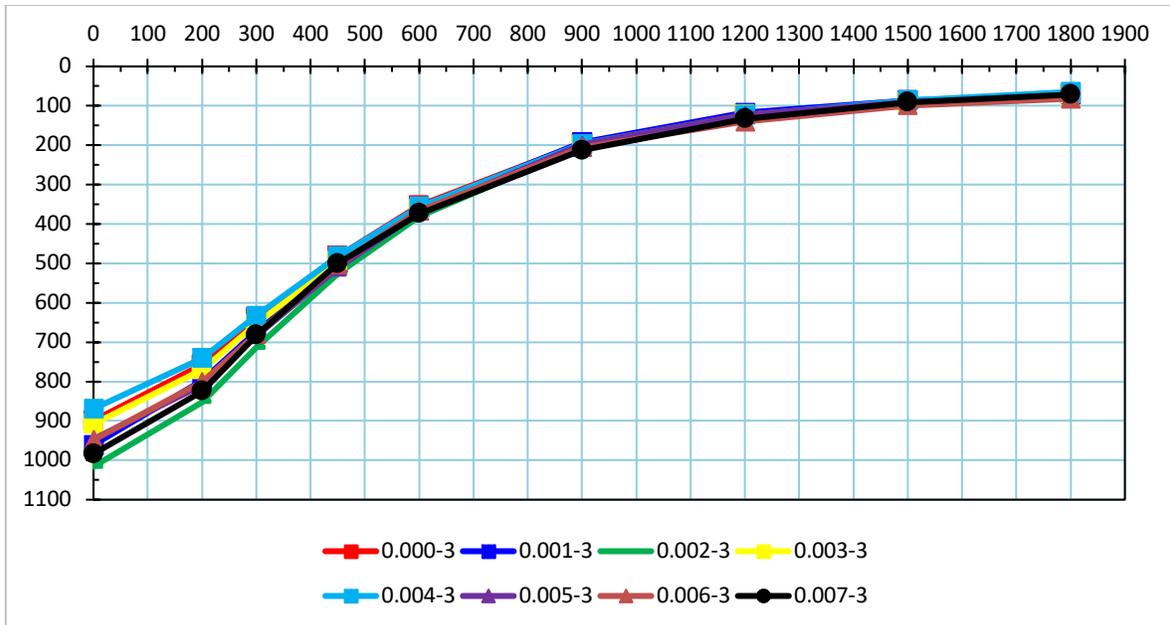


Figura 63. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 019 con acondicionamiento al millón pasadas de HVS



De igual manera que con el tramo 015 (sin acondicionamiento), se realizó el análisis gráfico (ver **Figura 64**) para las deflexiones promedio en el tramo 019 con acondicionamiento por temperatura, el análisis incluye los datos de deflectometría realizado con el Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) para todas las estaciones y con el Deflectómetro de superficie de pavimento (RSD, por sus siglas en Inglés) para las estaciones externas de medición directa, CL1 y CL5.

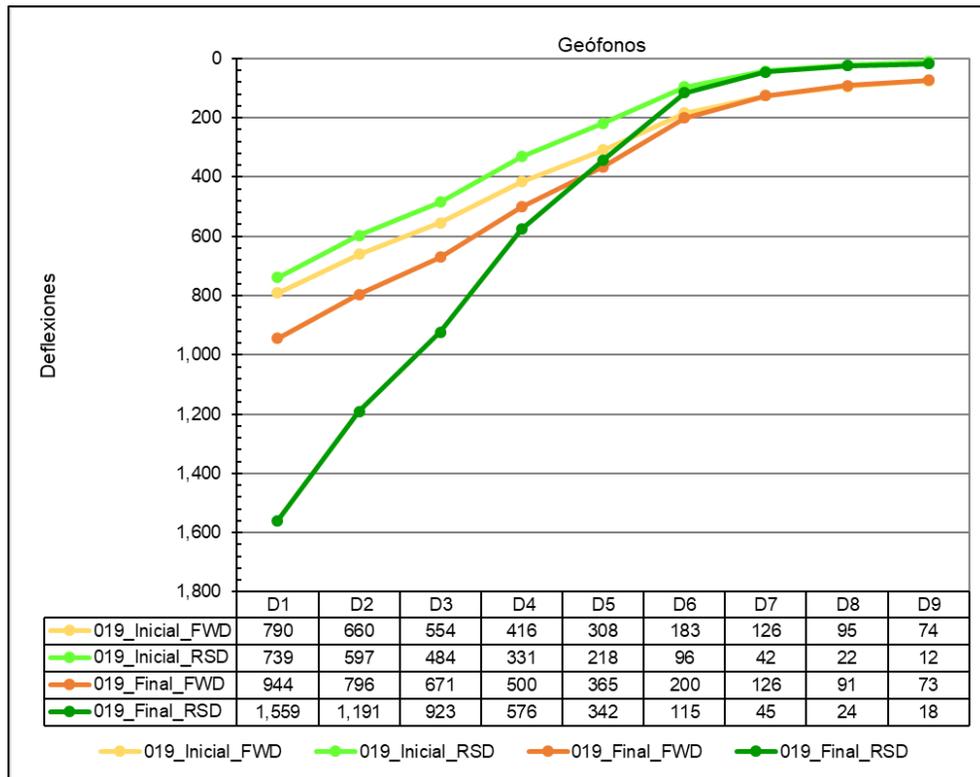


Figura 64. Deflexiones promedio FWD y RSD (CL1 y CL5) para tramo 019 inicial y final.

6.3.2.2 Deformación Permanente

Para determinar la evolución de la deformación permanente en la superficie del pavimento cada determinado número de ciclo, se utilizaron los dos perfilómetros laser con los que cuenta el HVS. De esta forma, el ahuellamiento se estima como la diferencia entre los puntos antes de aplicar carga (matriz base) y los puntos tomados después de cada ciclo de



carga de interés. A continuación, en la **Figura 65**, se muestra una vista tridimensional del cuenco de deformaciones, para el tramo de control con acondicionamiento por temperatura en su estado final después de un millón de pasadas (3,2 millones de ESAL's) del HVS. Por otra parte, en la **Figura 66** se muestra el perfil transversal para el mismo tramo en cuestión, según los valores promedio para cada perfil longitudinal (64 perfiles longitudinales generados por el HVS). Por último, en la **Figura 67** se muestra la evolución de la deformación permanente en el tramo de estudio (tramo 019).

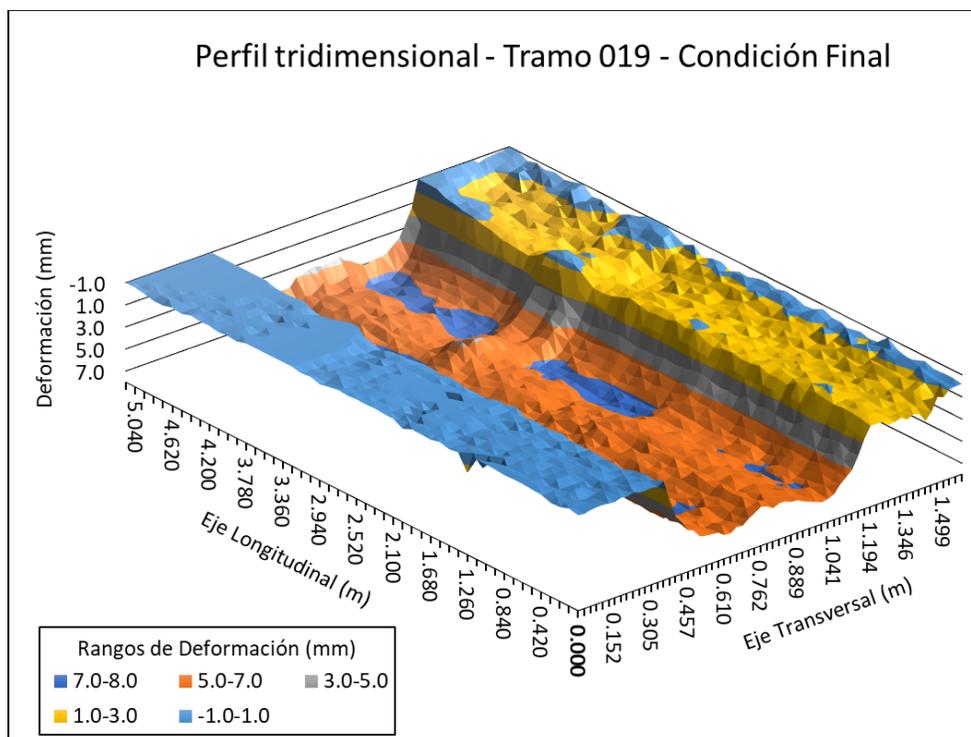


Figura 65. Perfil tridimensional deformado para el tramo 019 final.

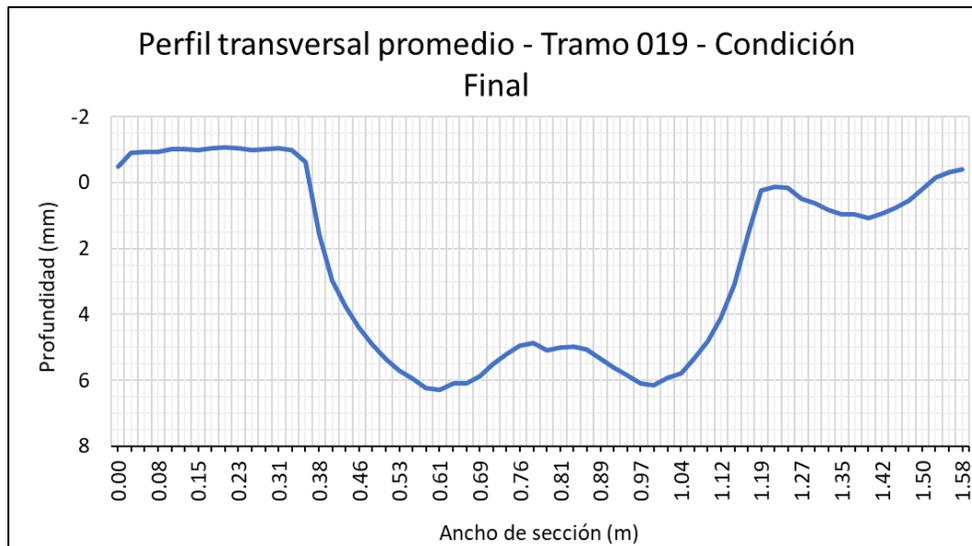


Figura 66. Perfil transversal promedio deformado para el tramo 019 final.

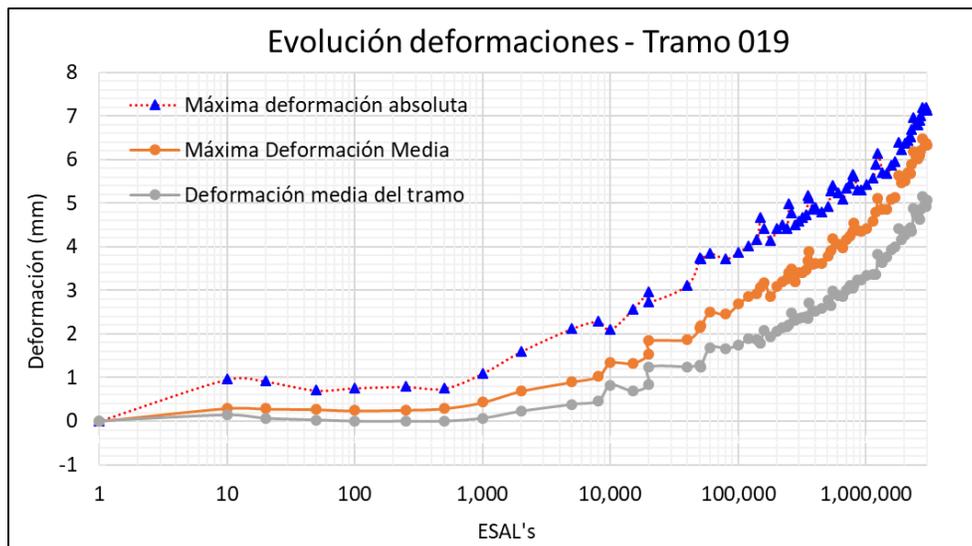


Figura 67. Evolución de las deformaciones para el tramo 019.

Según el perfil tridimensional, mostrado en la **Figura 65**, se aprecia cómo se acumula la mayor deformación permanente en los rangos de 5 mm a 7 mm. Sin embargo, también se aprecia áreas con deformación permanente de entre los 7 mm a 8 mm, pero en menor



proporción y en las zonas de influencia directa del par de llantas (a los extremos del centro, dentro de la zona de influencia del HVS).

Así mismo, en el perfil transversal promedio, presentado en la **Figura 66**, se observa como las mayores deformaciones acumuladas se ubican en la parte central de la sección alejado del centro con valores que superan los 6 mm.

Por otra parte, en el caso de la **Figura 67**, se muestran tres diferentes curvas. La curva de máxima deformación absoluta reporta el valor máximo de ahuellamiento en la zona de influencia directa de las llantas, sin importar si este valor se encuentra al inicio, parte intermedia o final del tramo. De forma similar, la máxima deformación media es el valor máximo de ahuellamiento de los valores promedio para cada sección longitudinal. Por último, la deformación media del tramo corresponde al promedio de los valores promedio para las 64 secciones longitudinales que generan los perfilómetros del HVS.

Al cabo de 1000000 de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) (condición final), se logró obtener una máxima deformación absoluta de 7,14 mm, una máxima deformación media de 6,28 mm y una deformación media del tramo de 5,12 mm. Estas tres curvas de evolución de la deformación muestran esa condición creciente del ahuellamiento según aumenta el número de pasadas. Como es de esperar, las curvas de máxima deformación media y de deformación media del tramo mantiene su similitud en comportamiento desde su condición inicial hasta final. Sin embargo; en el caso de la máxima deformación absoluta, se observa cómo es hasta después de las 100.000 ESAL's que adopta el mismo comportamiento que las curvas medias. Este comportamiento es tanto creciente como con valores máximos para la condición máxima absoluta, menores para la condición media e intermedia para la condición de máximos medios para todas las repeticiones del HVS.

6.3.2.3 Índice de regularidad internacional (IRI)

De igual forma que en la deformación permanente, el IRI se calcula a partir de los datos de desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento recolectados por los dos perfilómetros inerciales láser con los que cuenta el HVS (uno en cada extremo de la

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 118 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



llanta). Sin embargo; en este caso los datos se procesan en el software PROVAL para obtener la regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal del tramo. A continuación, en la Figura 68, se muestra la evolución del IRI para el tramo control con acondicionamiento por temperatura (tramo 019). Es importante mencionar que solo se consideraron aquellos perfiles longitudinales dentro del área de influencia directa de la llanta (32 de los 64 disponibles, 16 a cada lado del eje de aplicación de carga del HVS).

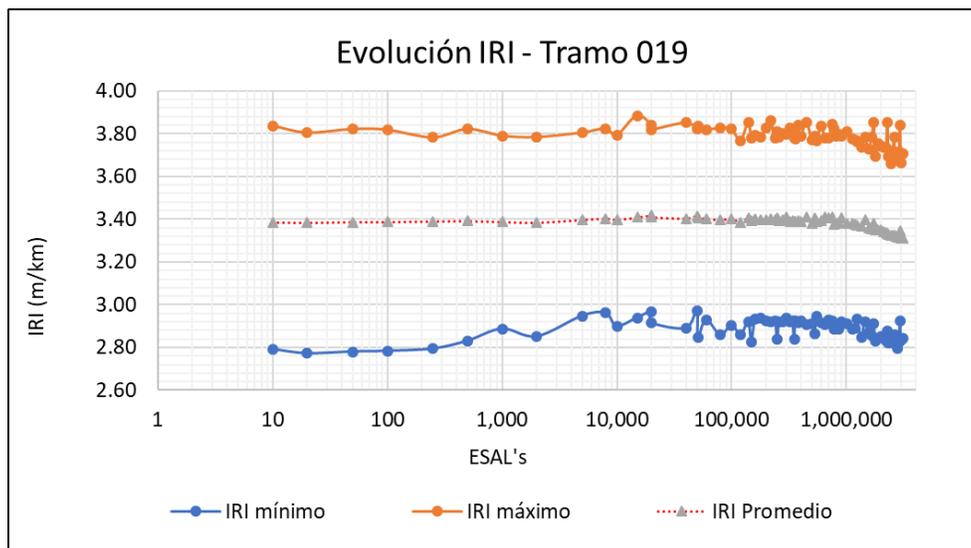


Figura 68. Evolución del Índice de rugosidad internacional para el tramo 019.

Para la condición final del tramo, al cabo de un millón de repeticiones con el HVS, se obtuvieron valores de IRI menores respecto a su condición inicial. Según se muestra en la figura anterior, se obtuvo para la condición final un IRI de 2,84 como valor mínimo, 3,70 como máximo y 3,31 como valor promedio. En los tres casos, la tendencia de los valores es constante hasta los 10000 ESAL's; sin embargo, posteriormente presentan una tendencia decreciente. La diferencia entre el valor final e inicial es de 0,003 para el IRI mínimo, 0,19 según el IRI máximo y 0,1 en términos promedio.



6.3.2.4 Fricción

Para la determinación de la fricción, se realizó el método de prueba estándar del Péndulo Inglés. En la condición inicial del tramo se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona externa aledaña del tramo 019; sin embargo, para la determinación del valor PTV de fricción (valor del ensayo del péndulo) solo se tomaron en cuenta 12 puntos (correspondientes a la zona interna del tramo en sentido del avance de la llanta). De esta forma, se obtuvo que el valor inicial (cero pasadas del HVS) de fricción es igual a 67. Por otra parte, para la condición final se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona central del tramo; sin embargo, al igual que para la condición inicial, se tomaron en cuenta los 12 puntos centrales que representan la zona de influencia directa de la llanta del HVS. De esta forma, se obtuvo que el valor final (un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de ESAL's)) de fricción es igual a 59. En términos generales, se observa una reducción de la fricción en 8 PTV para el tramo control con acondicionamiento por temperatura.

6.4 Mezcla asfáltica con 1,0% de PET

6.4.1 Mezcla sin acondicionamiento

La mezcla asfáltica modificada con 1,0% de Polietileno Tereftalato (PET), al igual que la mezcla asfáltica de control, fueron fabricadas. Las mezclas asfálticas modificadas con 1,0% de PET fueron construidas en el tramo 016 del HVS, sin ningún tipo de acondicionamiento por temperatura y estudiada a temperatura ambiente, y también, en el tramo 020 del HVS donde sí se le aplica el acondicionamiento por temperatura.

6.4.1.1 Deflectometría

De manera análoga con el tramo de control, se emplearon ensayos de inspección no destructiva (NDT, por sus siglas en inglés). Los análisis fueron realizados por medio de Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) y el Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD, por sus siglas en inglés). A continuación, en la **Figura 69**, **Figura 70**, **Figura 71** y **Figura 72** se muestran cada uno de los cuencos de deflectometría para el

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 120 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



tramo sin acondicionamiento (tramo 016) en estado inicial o cero pasadas del simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) y en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de ESALS).

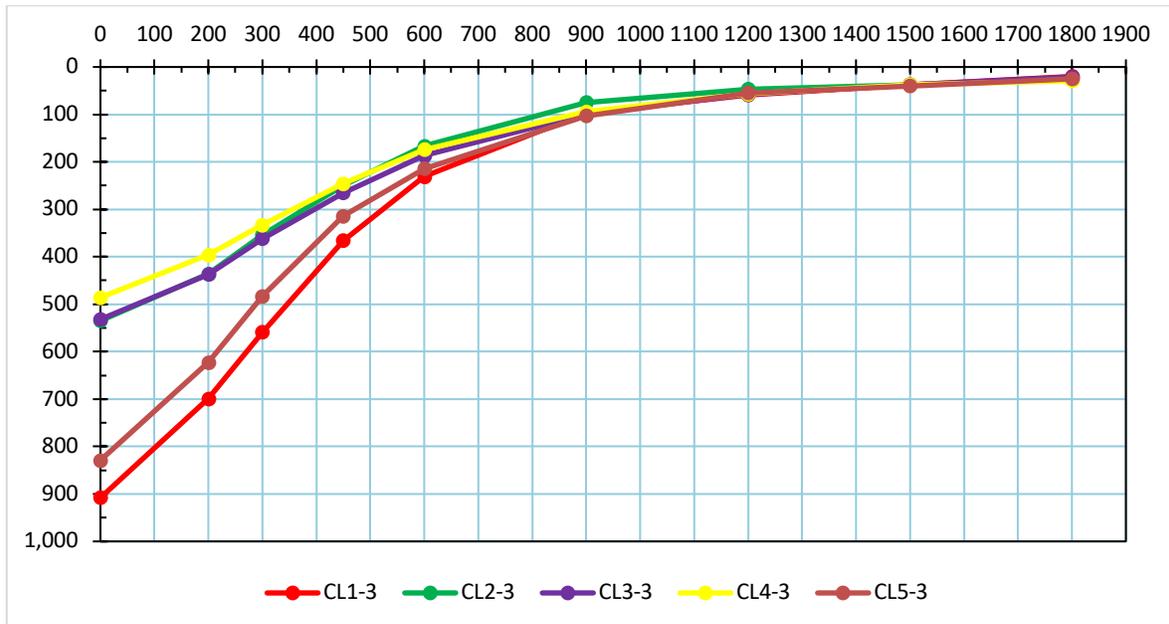


Figura 69. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 016 sin acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

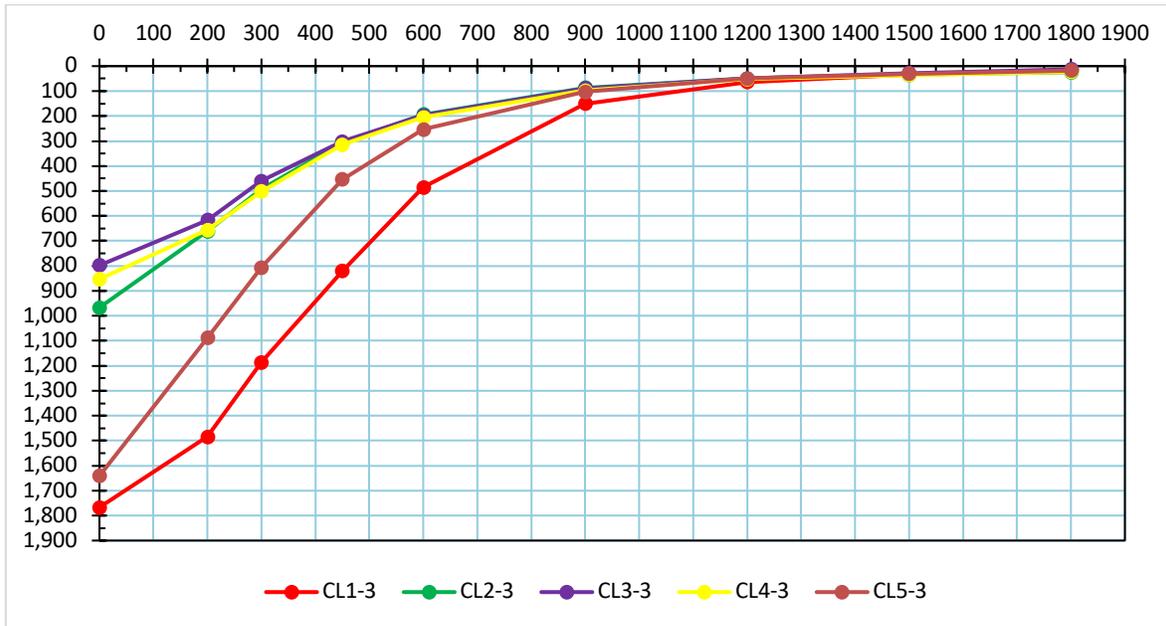


Figura 70. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 016 sin acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

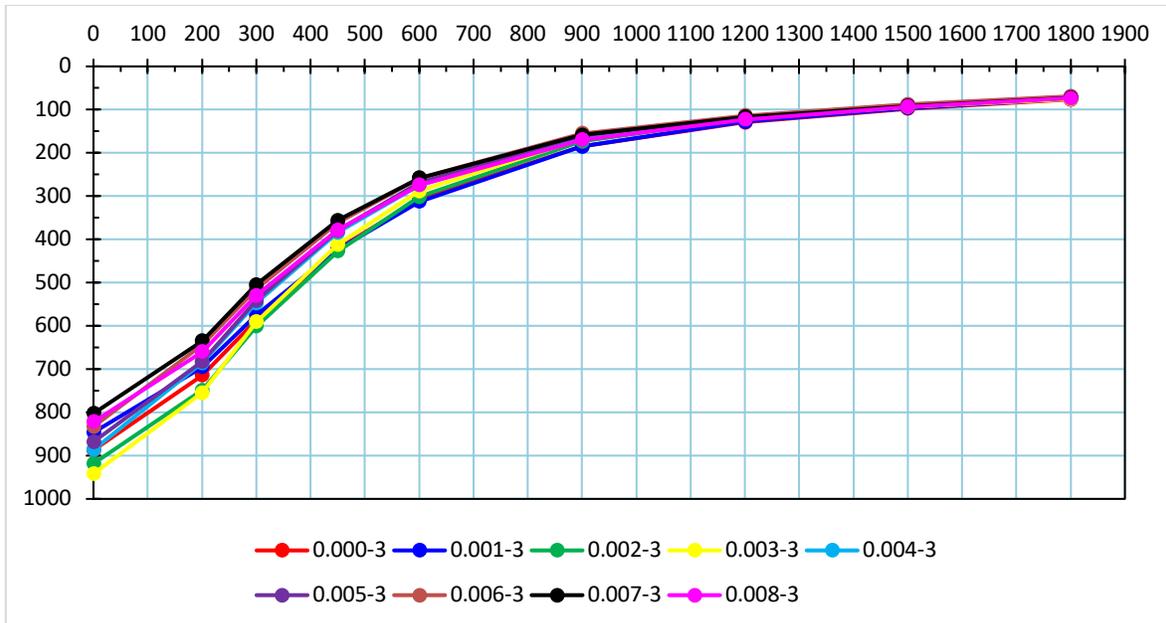


Figura 71. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 016 sin acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

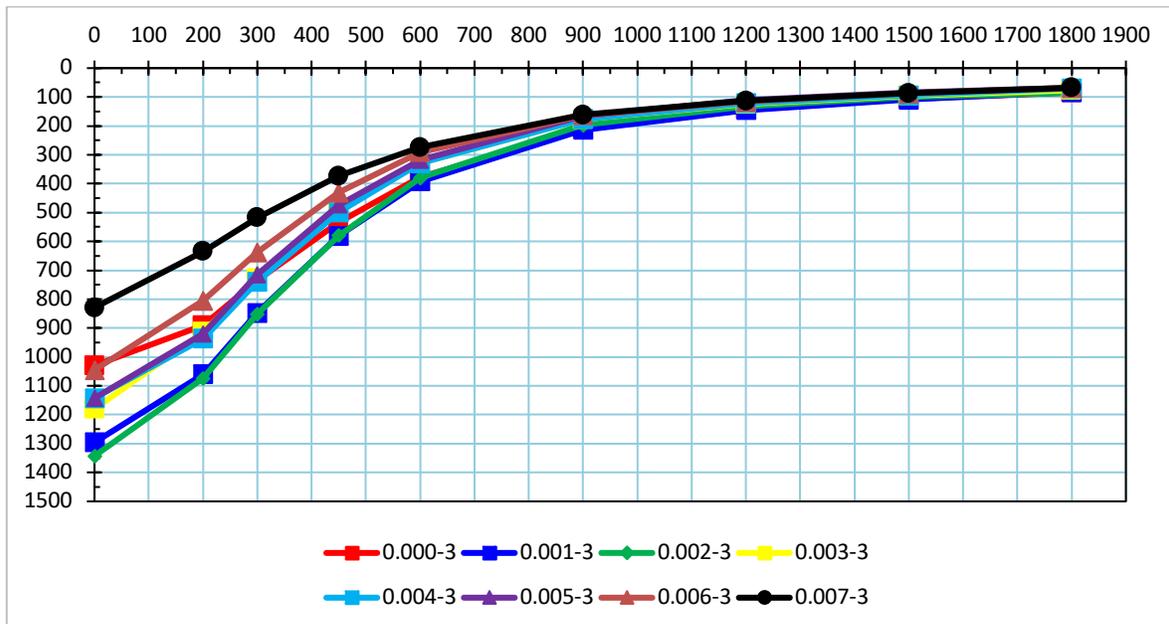


Figura 72. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 016 sin acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

De manera análoga a lo realizado con los tramos constituidos con la mezcla asfáltica de control, para el tramo 016 (sin acondicionamiento) se realizó el análisis gráfico (ver **Figura 73**) para las deflexiones promedio, el análisis incluye los datos de deflectometría realizado con el Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) para todas las estaciones existentes y con el Deflectómetro de superficie de pavimento (RSD, por sus siglas en Inglés) para las estaciones externas de medición directa paralela al sentido de aplicación de carga del HVS, CL1 y CL5.

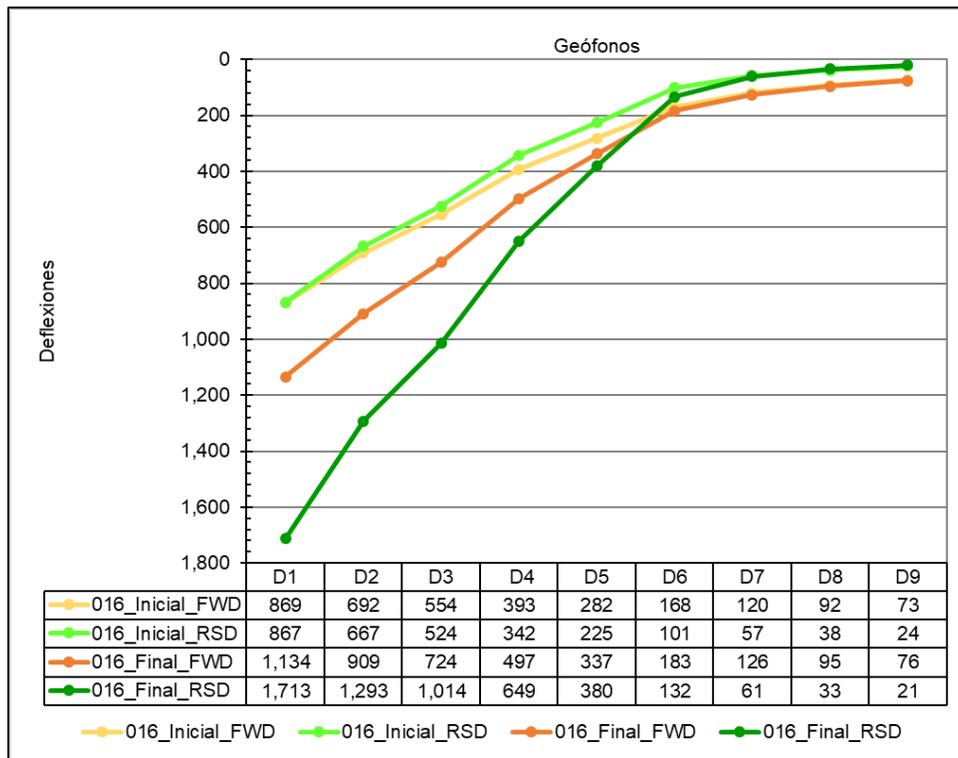


Figura 73. Deflexiones promedio FWD y RSD (CL1 y CL5) para tramo 016 inicial y final.

6.4.1.2 Deformación Permanente

Para determinar la evolución de la deformación permanente en la superficie del pavimento cada determinado número de ciclo, se utilizaron los dos perfilómetros laser con los que cuenta el HVS. De esta forma, el ahuellamiento se estima como la diferencia entre los puntos antes de aplicar carga (matriz base) y los puntos tomados después de cada ciclo de carga de interés.

A continuación, en la **Figura 74**, se muestra una vista tridimensional del cuenco de deformaciones, para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PET sin acondicionamiento en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de ESAL's) . Por otra parte, en la **Figura 75** se muestra el perfil transversal para el mismo tramo en cuestión,



según los valores promedio para cada perfil longitudinal (64 perfiles longitudinales generados por el HVS). Por último, en la **Figura 76** se muestra la evolución de la deformación permanente en el tramo de estudio (tramo 016).

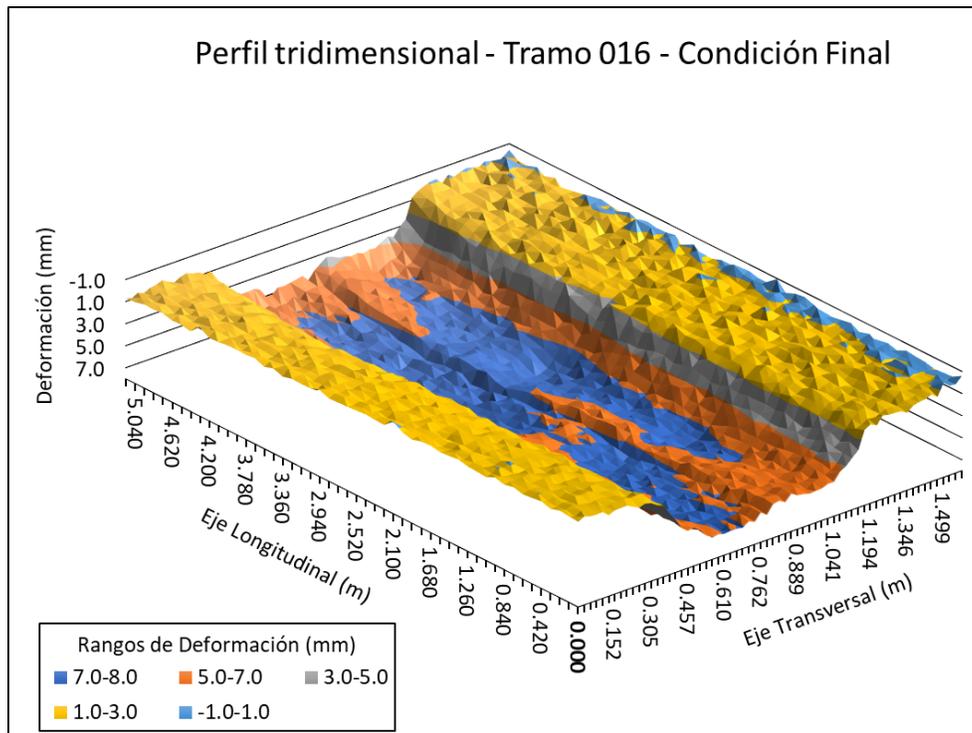


Figura 74. Perfil tridimensional deformado para el tramo 016 final.



Figura 75. Perfil transversal promedio deformado para el tramo 016 final.

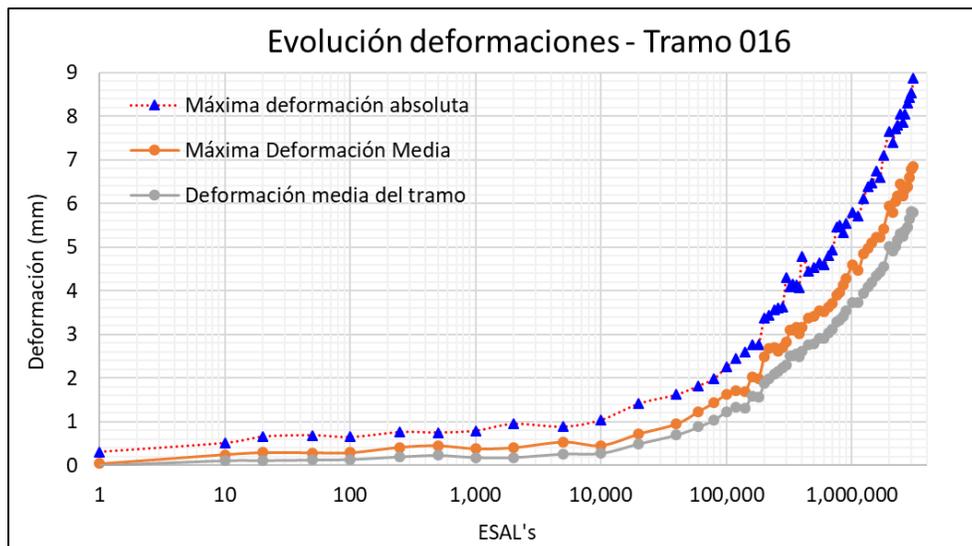


Figura 76. Evolución de las deformaciones para el tramo 016.

Según el perfil tridimensional, mostrado en la **Figura 74**, se aprecia cómo se acumula la mayor deformación permanente en los rangos de 7 mm a 8 mm. Sin embargo, también se aprecia áreas con deformación permanente de entre los 5 mm a 7 mm, pero en menor proporción, ubicadas tanto en las zonas aledañas a donde se encuentra la influencia directa

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 126 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



del par de llantas en las cuales se aplican las repeticiones de carga como en los extremos longitudinales del tramo. Así mismo, en el perfil transversal promedio, presentado en la **Figura 75**, se observa como las mayores deformaciones acumuladas se ubican en la parte central de la sección alejado del centro con valores máximos cercanos a los 7 mm.

En la **Figura 76**, se muestran tres diferentes curvas. La curva de máxima deformación absoluta reporta el valor máximo de ahuellamiento en la zona de influencia directa de las llantas. De forma similar, la máxima deformación media es el valor máximo de ahuellamiento de los valores promedio para cada sección longitudinal. Por último, la deformación media del tramo corresponde al promedio de los valores promedio para las 64 secciones longitudinales que generan los perfilómetros del HVS.

A un 1000000 de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) (condición final), se logró obtener una máxima deformación absoluta de 8,87 mm, una máxima deformación media de 6,85 mm y una deformación media del tramo de 5,79 mm. Estas tres curvas muestran un comportamiento tanto creciente como con valores máximos para la condición máxima absoluta, menores para la condición media e intermedia para la condición de máximos medios para todas las repeticiones del HVS.

6.4.1.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

De igual forma que en la deformación permanente, el IRI se calcula a partir de los datos de desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento recolectados por los dos perfilómetros inerciales láser con los que cuenta el HVS (uno en cada extremo de las llantas). Sin embargo; en este caso los datos se procesan en el software PROVAL para obtener la regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal del tramo. A continuación, en la Figura 77 se muestra la evolución del IRI para el tramo 016 (tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PET sin acondicionamiento). Es importante mencionar que solo se consideraron aquellos perfiles longitudinales dentro del área de influencia directa de las llantas (32 de los 64 disponibles, 16 a cada lado del eje de aplicación de carga del HVS).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 127 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

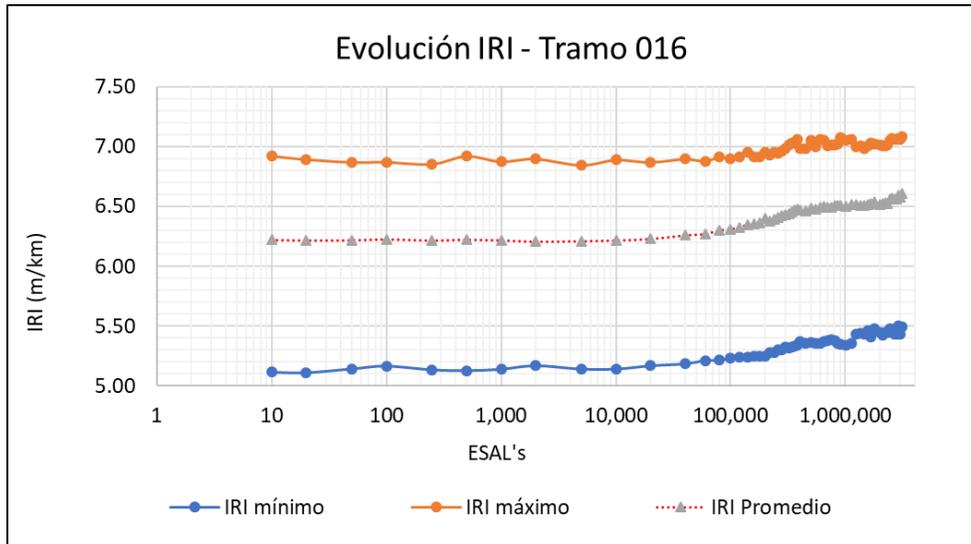


Figura 77. Evolución del Índice de rugosidad internacional para el tramo 016.

Para la condición final del tramo, al cabo de un millón de repeticiones con el HVS (3.2 millones de ESAL's), se obtuvieron valores de IRI mayores respecto a su condición inicial. Según se muestra en la figura anterior, se obtuvo para la condición final un IRI de 5,49 como valor mínimo, 7,09 como máximo y 6,61 como valor promedio. En los tres casos, la tendencia de los valores es constante hasta los 100000 ESAL's y posteriormente creciente, donde la diferencia entre el valor final e inicial es de 0,40 para el IRI mínimo, 0,16 para la condición máximo y 0,40 en términos promedio.

6.4.1.4 Fricción

Para la determinación de la fricción, se realizó el método de prueba estándar del Péndulo Inglés. En la condición inicial del tramo se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona externa aledaña del tramo 016; sin embargo, para la determinación del valor PTV de fricción (valor del ensayo del péndulo) solo se tomaron en cuenta 12 puntos (correspondientes a la zona interna del tramo en sentido del avance de la llanta). De esta forma, se obtuvo que el valor inicial (cero pasadas del HVS) de fricción es igual a 72. Por otra parte, para la condición final se evaluaron 8 puntos cada 100 cm a lo largo de la zona central del tramo; sin embargo, se tomaron en cuenta los 6 puntos que representan la zona



de influencia directa de la llanta del HVS. De esta forma, se obtuvo que el valor final (un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de ESAL's)) de fricción es igual a 45. En términos generales, se observa una reducción de la fricción en 27 PTV para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PET sin acondicionamiento. A pesar de que la caída es mayor el valor final de fricción es similar al de la mezcla de control.

6.4.2 Mezcla con acondicionamiento por temperatura

6.4.2.1 Deflectometría

Los análisis fueron realizados por medio de Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) y el Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD, por sus siglas en inglés). A continuación, en la **Figura 78**, **Figura 79**, **Figura 80** y **Figura 81** se muestran cada uno de los cuencos de deflectometría para el tramo con acondicionamiento (tramo 020) en estado inicial o cero pasadas (temperatura superficial del pavimento 21°C) del simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) y en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (temperatura superficial del pavimento 26,4°C).

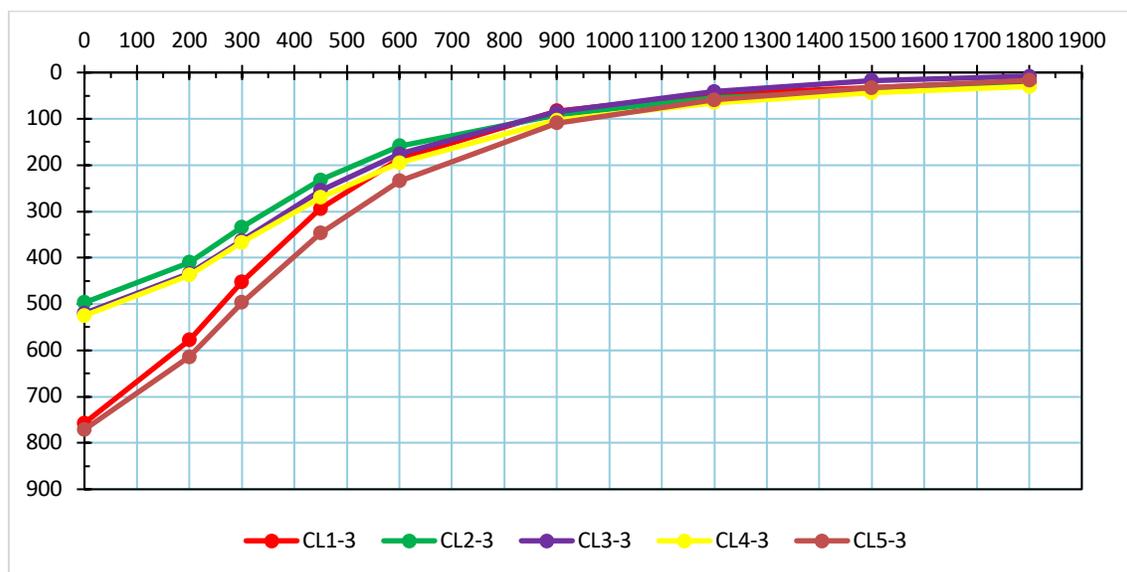


Figura 78. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 020 con acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

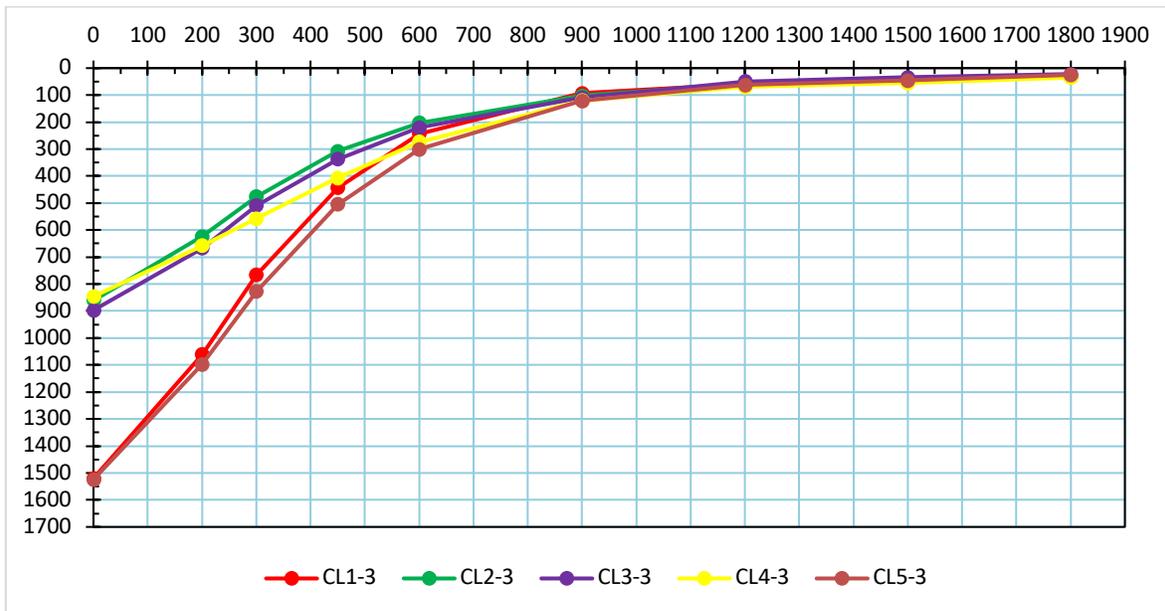


Figura 79. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 020 con acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

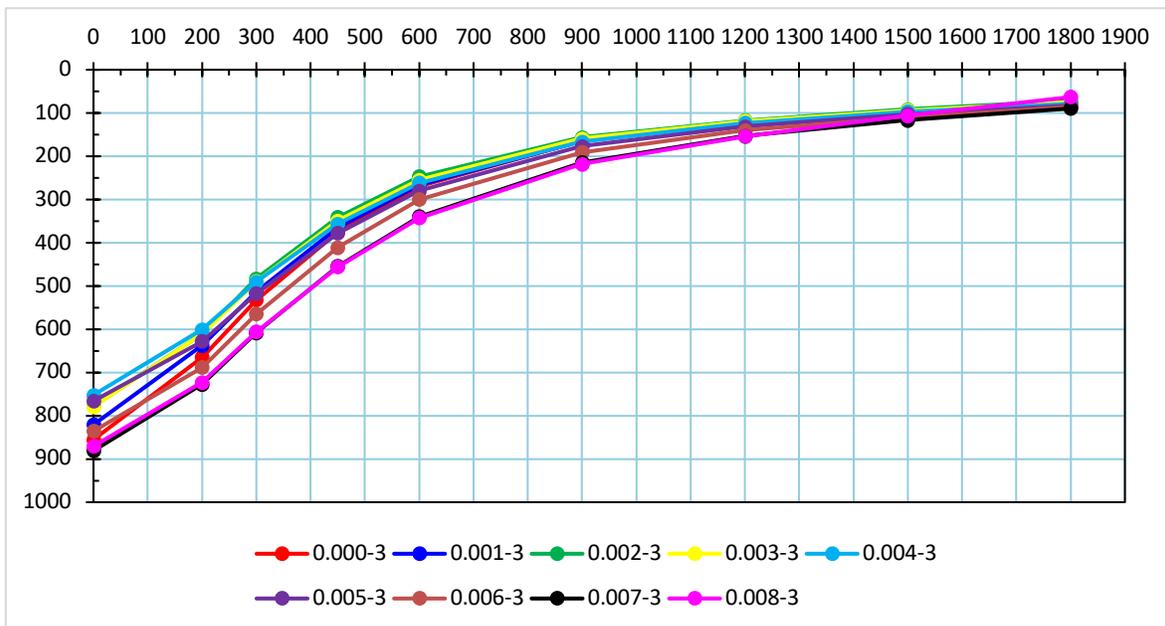


Figura 80. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 020 con acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

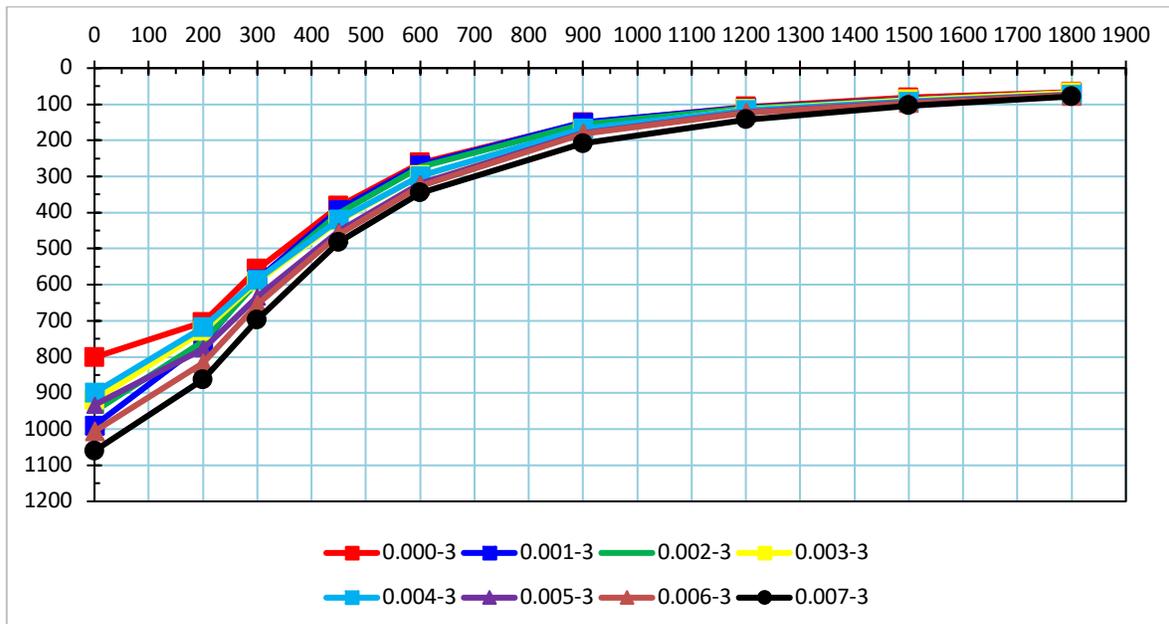


Figura 81. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 020 con acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

De manera análoga con el tramo 016 (sin acondicionamiento) se realizó el análisis gráfico (ver **Figura 82**) para las deflexiones promedio en el tramo 020 con acondicionamiento por temperatura, el análisis incluye los datos de deflectometría realizado con el Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) para todas las estaciones y con el Deflectómetro de superficie de pavimento (RSD, por sus siglas en Inglés) para las estaciones externas de medición directa, CL1 y CL5.

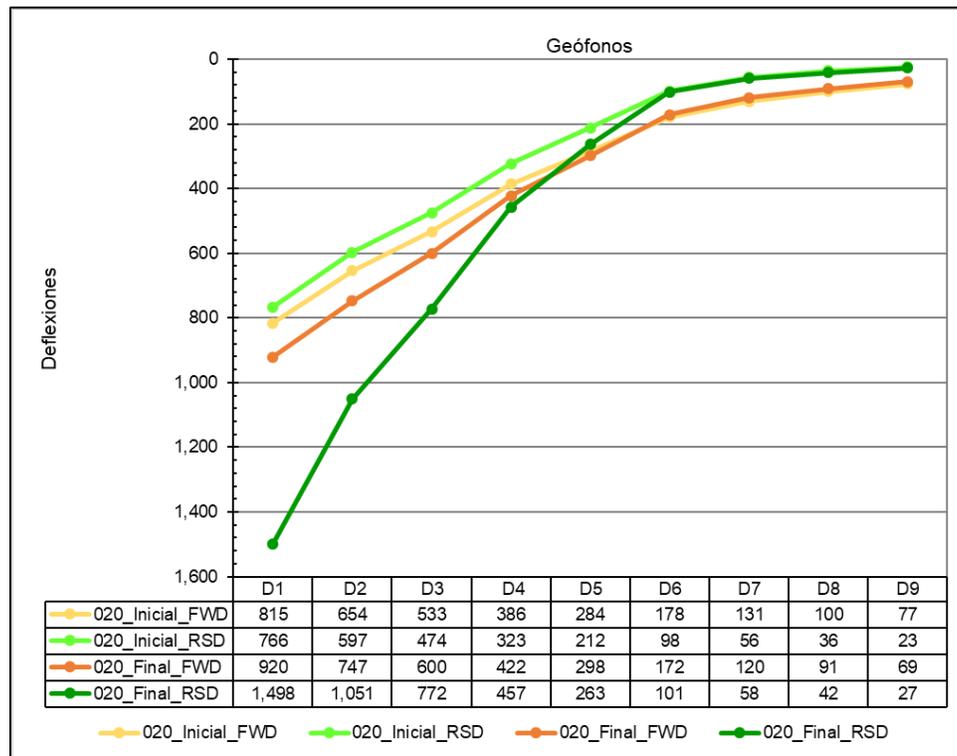


Figura 82. Deflexiones promedio FWD y RSD (CL1 y CL5) para tramo 020 inicial y final.

6.4.2.2 Deformación Permanente

Para determinar la evolución de la deformación permanente en la superficie del pavimento cada determinado número de ciclo, se utilizaron los dos perfilómetros laser con los que cuenta el HVS. De esta forma, el ahuellamiento se estima como la diferencia entre los puntos antes de aplicar carga (matriz base) y los puntos tomados después de cada ciclo de carga de interés.

A continuación, en la **Figura 83**, se muestra una vista tridimensional del cuenco de deformaciones, para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PET y acondicionamiento por temperatura en su estado final después de un millón de pasadas del HVS. Por otra parte, en la **Figura 84** se muestra el perfil transversal para el mismo tramo en cuestión, según los valores promedio para cada perfil longitudinal (64 perfiles longitudinales



generados por el HVS). Por último, en la **Figura 85** se muestra la evolución de la deformación permanente.

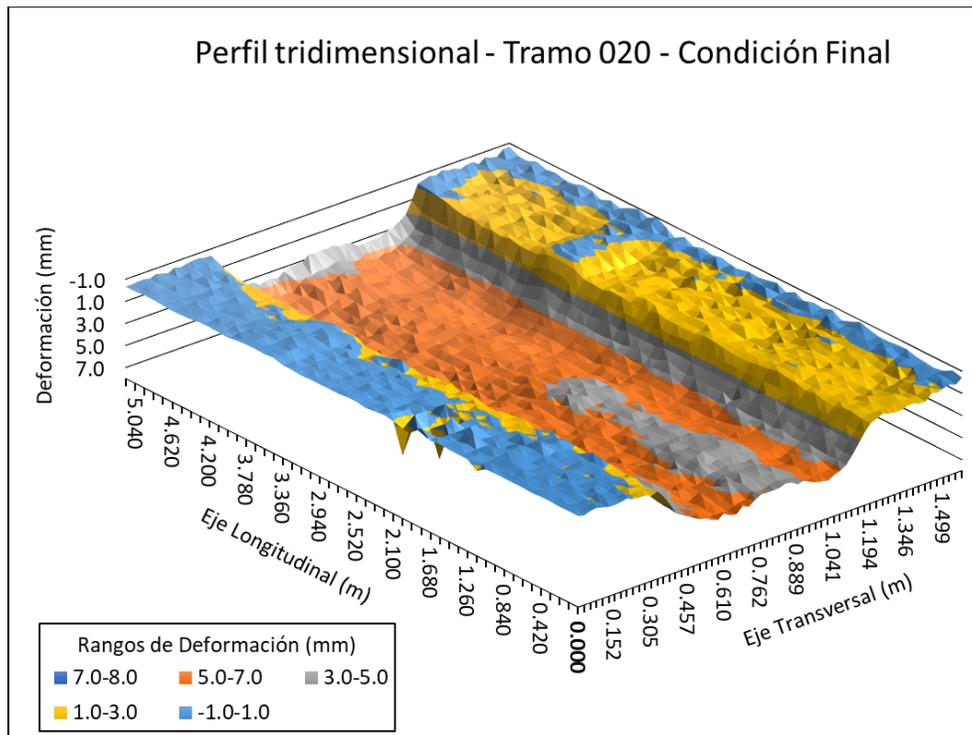


Figura 83. Perfil tridimensional deformado para el tramo 020 final.

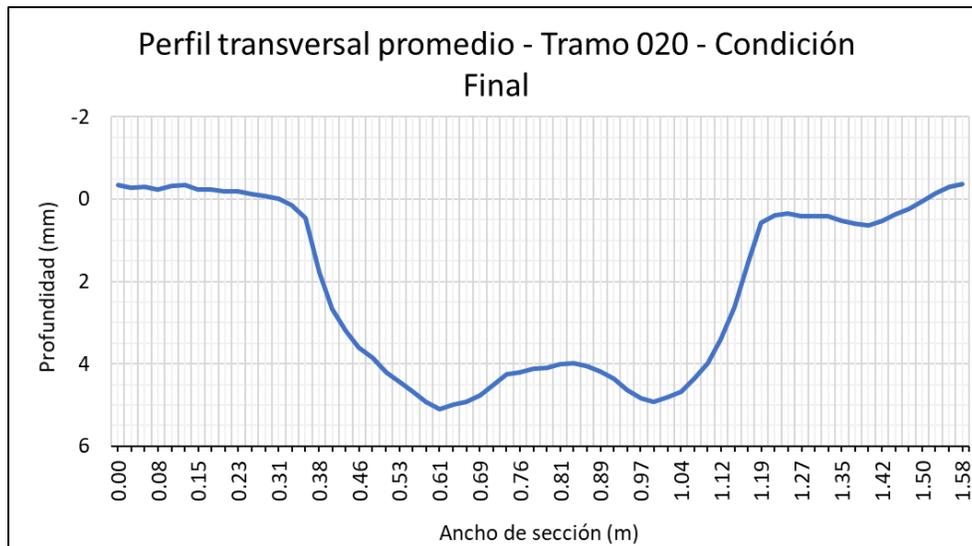


Figura 84. Perfil transversal promedio deformado para el tramo 020 final.

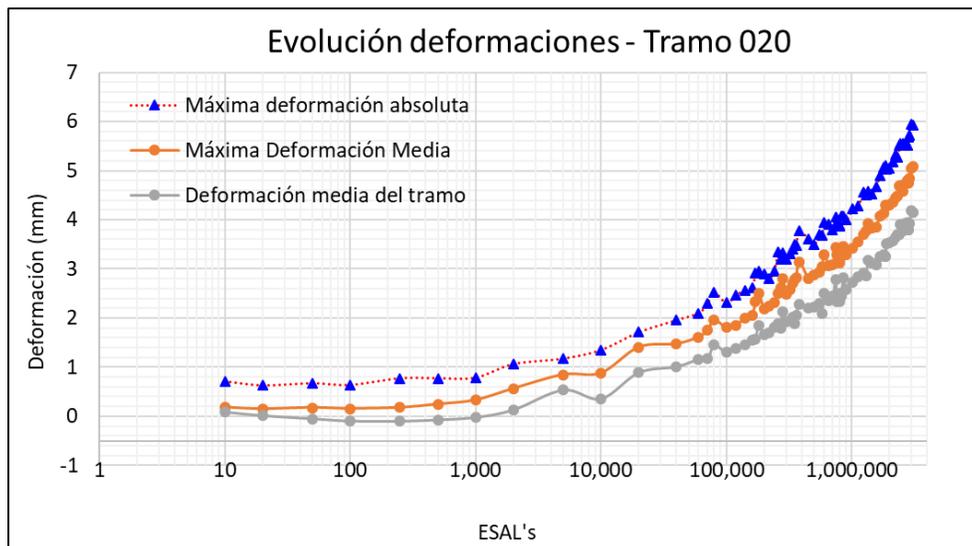


Figura 85. Evolución de las deformaciones para el tramo 020.

Según el perfil tridimensional, mostrado en la **Figura 83**, se aprecia cómo se acumula la mayor deformación permanente en los rangos de 5 mm a 7 mm. Sin embargo, también se aprecia áreas con deformación permanente de entre los 3 mm a 5 mm, pero en menor proporción, ubicadas en la zona central cerca de la cuota cero longitudinal del tramo. Así



mismo, en el perfil transversal promedio, presentado en la **Figura 84** se observa como las mayores deformaciones acumuladas se ubican en la parte central de la sección alejado del centro con valores máximos cercanos a los 5 mm.

Por otra parte, en el caso de la **Figura 85**, se muestran tres diferentes curvas. La curva de máxima deformación absoluta reporta el valor máximo de ahuellamiento en la zona de influencia directa de las llantas. De forma similar, la máxima deformación media es el valor máximo de ahuellamiento de los valores promedio para cada sección longitudinal. Por último, la deformación media del tramo corresponde al promedio de los valores promedio para las 64 secciones longitudinales que generan los perfilómetros del HVS.

A un 1 000 000 de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) (condición final), se logró obtener una máxima deformación absoluta de 5,93 mm, una máxima deformación media de 5,09 mm y una deformación media del tramo de 4,15 mm. Estas tres curvas de evolución de la deformación muestran esa condición creciente del ahuellamiento según aumenta el número de pasadas, donde la tendencia de las tres gráficas posee una tasa de crecimiento similar.

6.4.2.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

De igual forma que en la deformación permanente, el IRI se calcula a partir de los datos de desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento recolectados por los dos perfilómetros inerciales láser con los que cuenta el HVS (uno en cada extremo de las llantas). Sin embargo; en este caso los datos se procesan en el software PROVAL para obtener la regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal del tramo. A continuación, en la Figura 85, se muestra la evolución del IRI para el tramo 020 (tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PET y acondicionamiento por temperatura). Es importante mencionar que solo se consideraron aquellos perfiles longitudinales dentro del área de influencia directa de las llantas (32 de los 64 disponibles, 16 a cada lado del eje de aplicación de carga del HVS).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 135 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

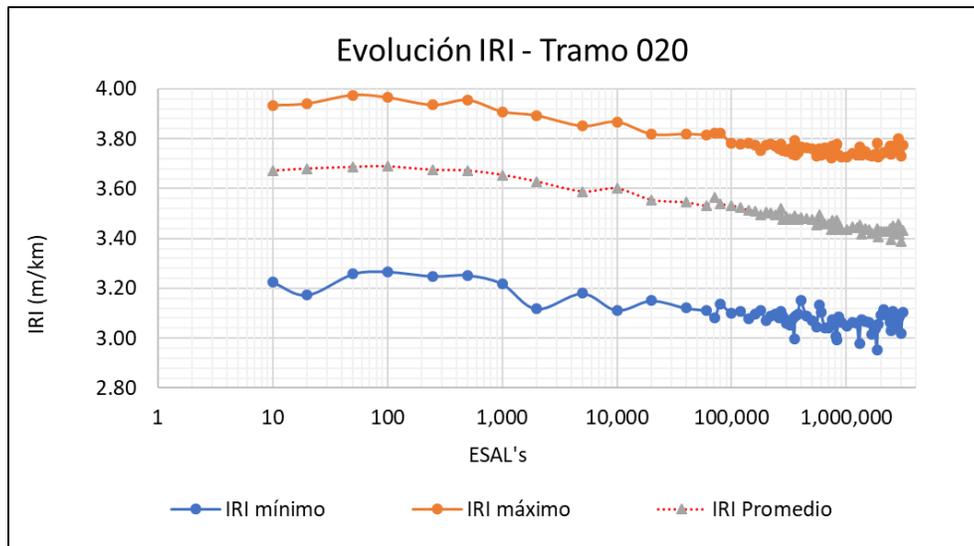


Figura 86. Evolución del Índice de rugosidad internacional para el tramo 020.

Para la condición final del tramo, al cabo de un millón de repeticiones con el HVS, se obtuvieron valores de IRI menores respecto a su condición inicial. Según se muestra en la figura anterior, se obtuvo para la condición final un IRI de 3,11 como valor mínimo, 3,77 como máximo y 3,43 como valor promedio. En los tres casos, la tendencia de los valores es constante hasta los 1 000 ESAL's (3,2 millones de ESAL's) y posteriormente decreciente, donde la diferencia entre el valor final e inicial es de -0,15 para el IRI mínimo, -0,26 para la condición máximo y -0,29 en términos promedio.



6.4.2.4 Fricción

Para la determinación de la fricción, se realizó el método de prueba estándar del Péndulo Inglés. En la condición inicial del tramo se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona externa aledaña del tramo 020; sin embargo, para la determinación del valor PTV de fricción (valor del ensayo del péndulo) solo se tomaron en cuenta 12 puntos (correspondientes a la zona interna del tramo en sentido del avance de la llanta).

De esta forma, se obtuvo que el valor inicial (cero pasadas del HVS) de fricción es igual a 73. Por otra parte, para la condición final se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona central del tramo; sin embargo, al igual que para la condición inicial, se tomaron en cuenta los 12 puntos centrales que representan la zona de influencia directa de la llanta del HVS.

De esta forma, se obtuvo que el valor final (un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de ESAL's)) de fricción es igual a 44. En términos generales, se observa una reducción de la fricción en 29 PTV para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PET con acondicionamiento.

6.5 Mezcla asfáltica con 1.0% de PEAD y otros plásticos

6.5.1 Mezcla sin acondicionamiento

Las mezclas asfálticas modificadas con 1,0% de PEAD y otros plásticos fueron construidas en el tramo 017 y 021 del HVS. El tramo 017 no posee acondicionamiento térmico fue y estudiada a temperatura ambiente. Por otro lado, el tramo 021 fue al sí se le aplicó un acondicionamiento por temperatura.

6.5.1.1 Deflectometría

De igual forma que con el tramo de control, se emplearon ensayos de inspección no destructiva (NDT, por sus siglas en inglés). Los análisis fueron realizados por medio de Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) y el Deflectómetro de superficie

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 137 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



del pavimento (RSD, por sus siglas en inglés). A continuación, en la **Figura 87**, **Figura 88**, **Figura 89** y **Figura 90** se muestran cada uno de los cuencos de deflectometría para el tramo sin acondicionamiento (tramo 017) en estado inicial o cero pasadas del simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) y en su estado final después de un millón de pasadas del HVS.

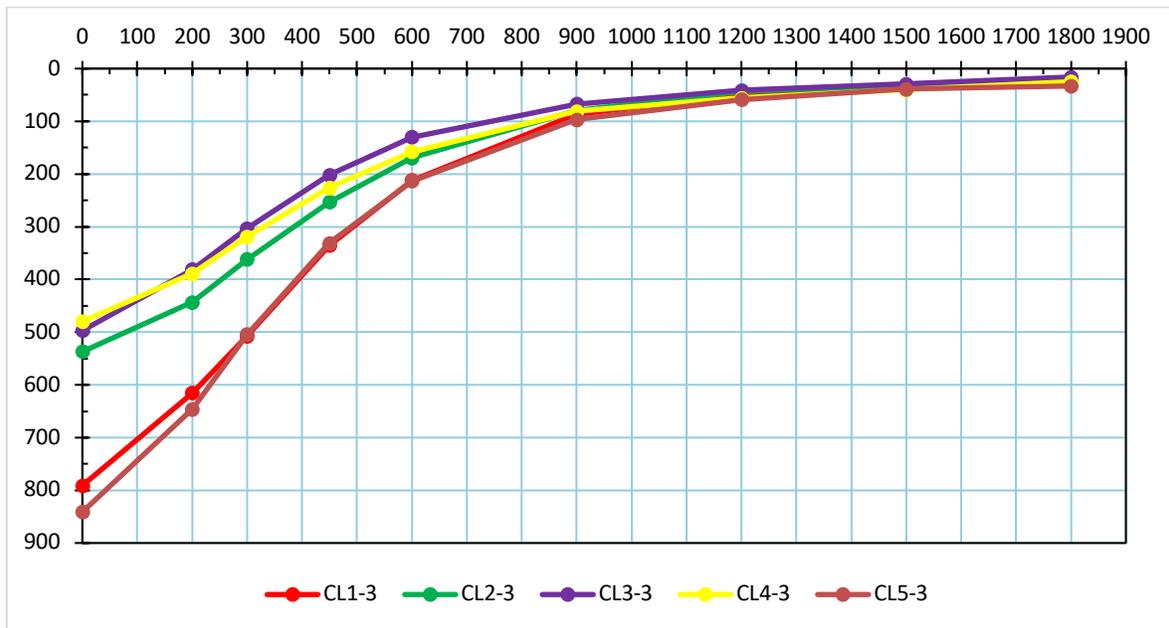


Figura 87. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 017 sin acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

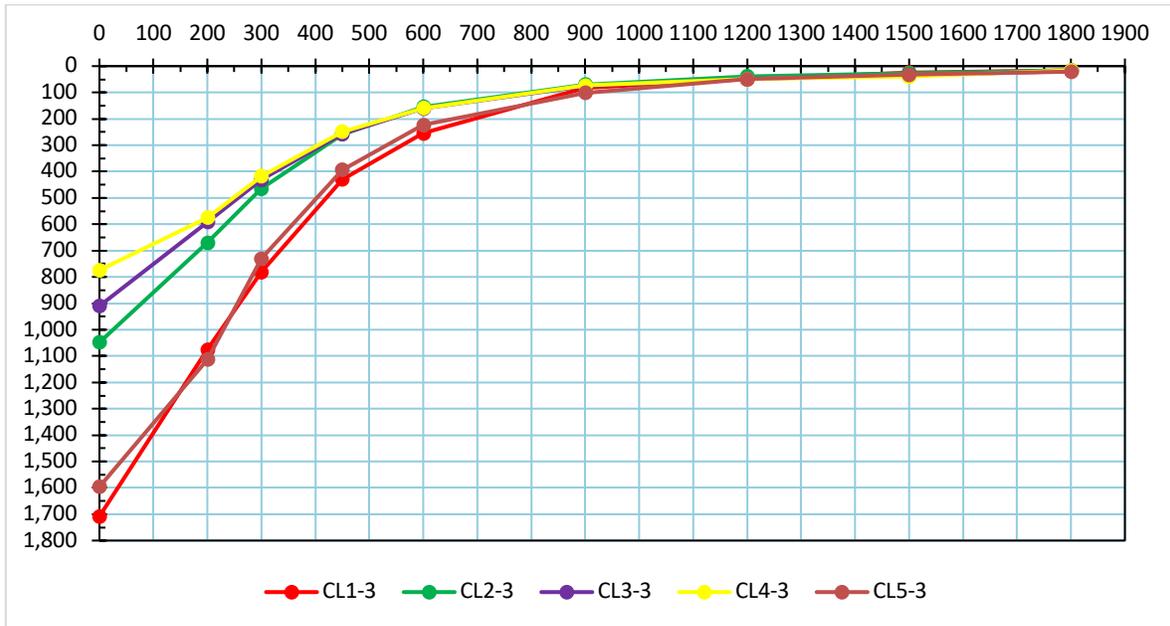


Figura 88. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 017 sin acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

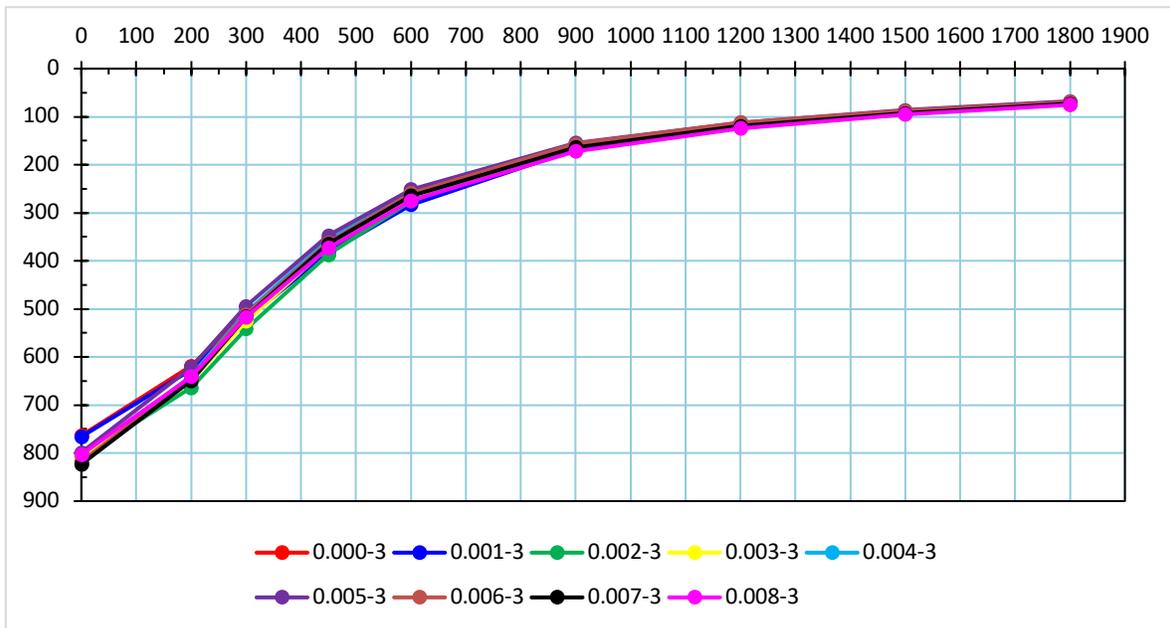


Figura 89. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 017 sin acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

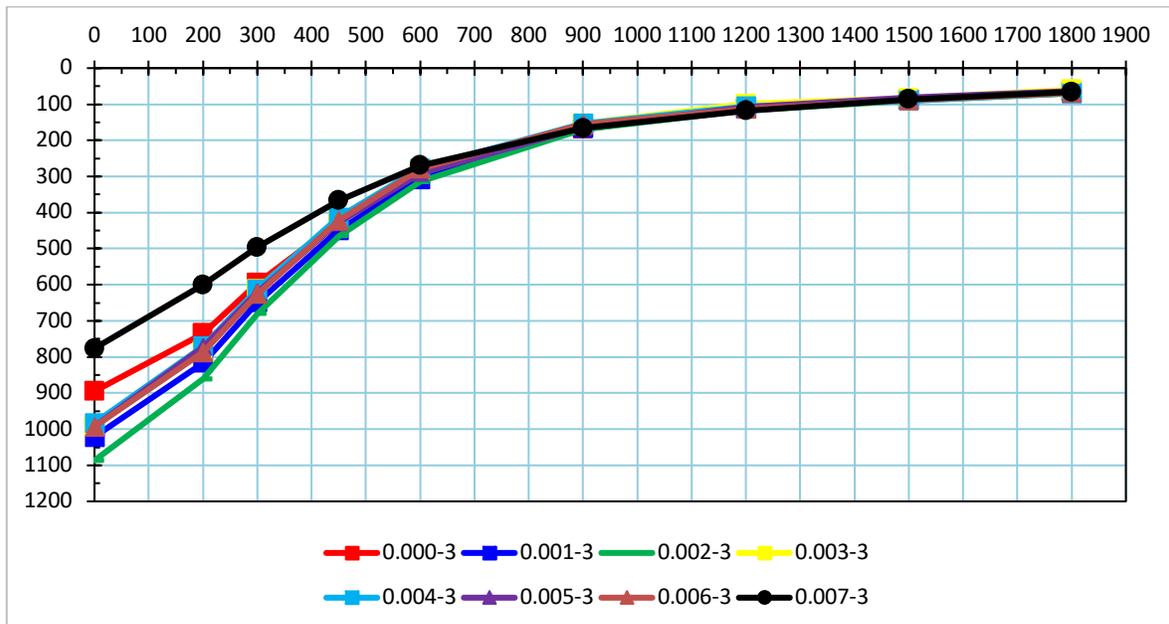


Figura 90. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 017 sin acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

De manera análoga a lo realizado con los tramos constituidos con la mezcla asfáltica de control y la mezcla con PET, para el tramo 017 (sin acondicionamiento) se realizó el análisis grafico (ver **Figura 91**) para las deflexiones promedio, el análisis incluye los datos de deflectometría realizado con el Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) para todas las estaciones existentes y con el Deflectómetro de superficie de pavimento (RSD, por sus siglas en Inglés) para las estaciones externas de medición directa paralela al sentido de aplicación de carga del HVS, CL1 y CL5.

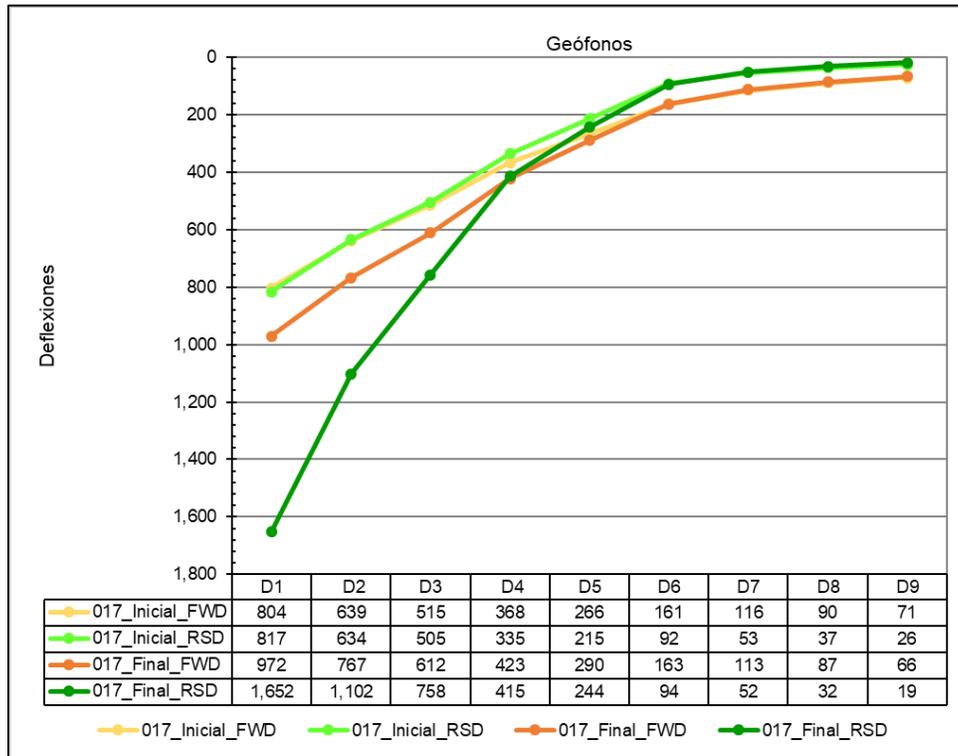


Figura 91. Deflexiones promedio FWD y RSD (CL1 y CL5) para tramo 017 inicial y final.

6.5.1.2 Deformación Permanente

Para determinar la evolución de la deformación permanente en la superficie del pavimento cada determinado número de ciclo, se utilizaron los dos perfilómetros laser con los que cuenta el HVS. De esta forma, el ahuellamiento se estima como la diferencia entre los puntos antes de aplicar carga (matriz base) y los puntos tomados después de cada ciclo de carga de interés. A continuación, en la **Figura 92**, se muestra una vista tridimensional del cuenco de deformaciones, para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PEAD y otros plásticos sin acondicionamiento en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (3,2 millones de ESAL's) . Por otra parte, en la **Figura 93** se muestra el perfil transversal para el mismo tramo en cuestión, según los valores promedio para cada perfil



longitudinal (64 perfiles longitudinales generados por el HVS). Por último, en la **Figura 94** se muestra la evolución de la deformación permanente.

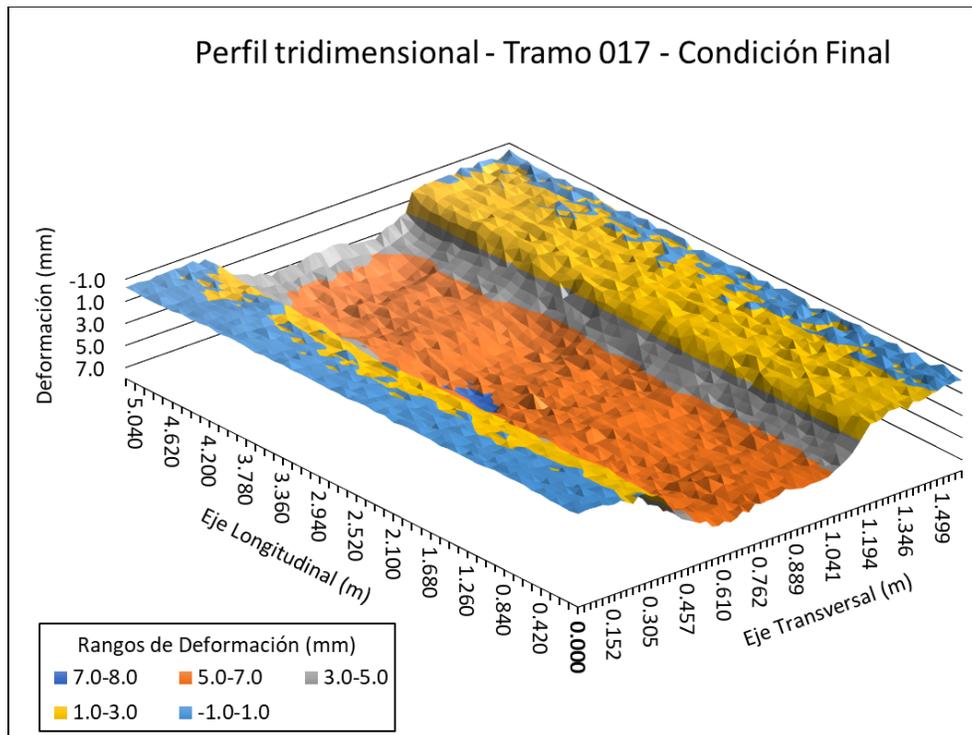


Figura 92. Perfil tridimensional deformado para el tramo 017 final.

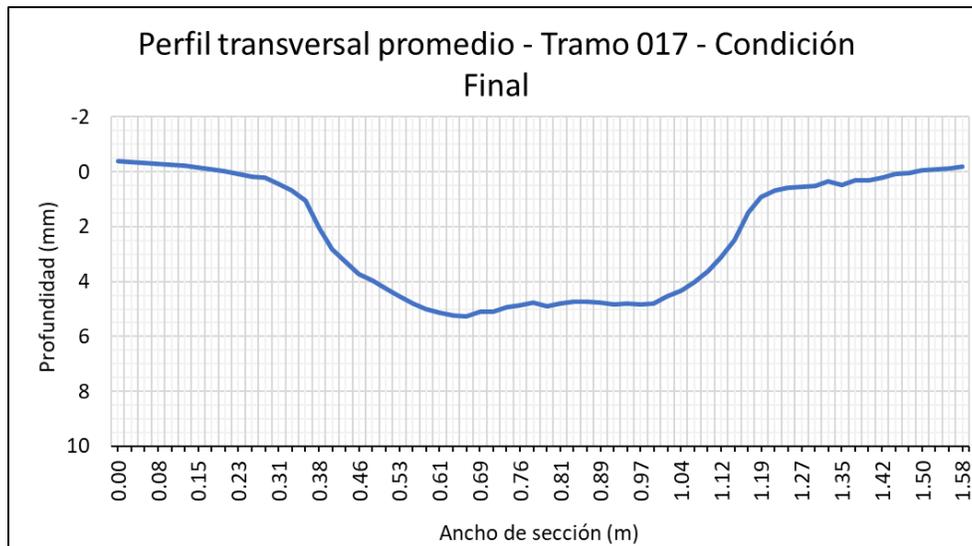


Figura 93. Perfil transversal promedio deformado para el tramo 017 final.

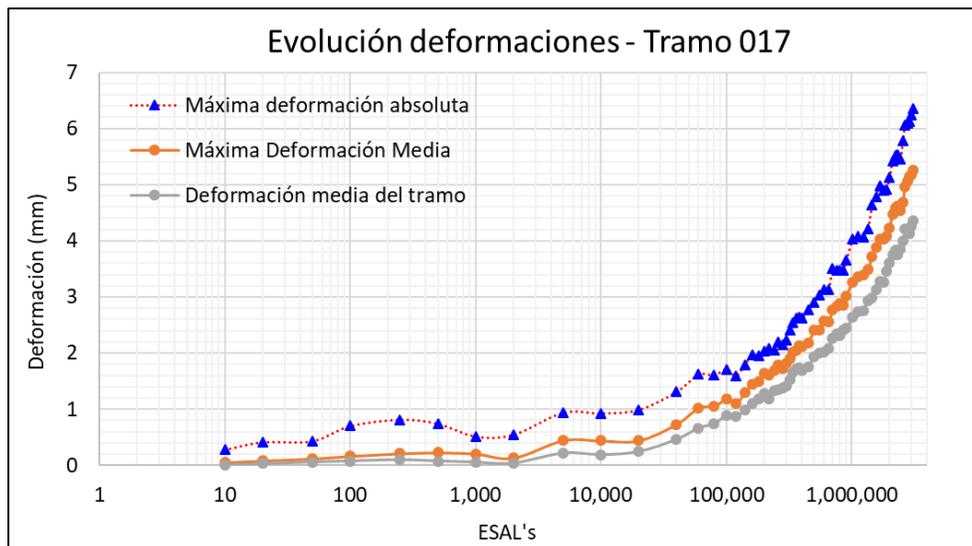


Figura 94. Evolución de las deformaciones para el tramo 017.

Según el perfil tridimensional, mostrado en la **Figura 92**, se aprecia cómo se acumula la mayor deformación permanente en los rangos de 5 mm a 7 mm en sentido del avance de la llanta. Así mismo, en el perfil transversal promedio, presentado en la **Figura 93**, se observa como las mayores deformaciones promedio se ubican en la parte central de la



sección a lo largo de todo el ancho de influencia directa de las llantas del HVS, con valores que cercanos a los 5,5 mm. La sección de máxima deformación es casi constante en toda su anchura donde las variaciones son menores a 1 mm.

Por otra parte, en el caso de la **Figura 94**, se muestran tres diferentes curvas. La curva de máxima deformación absoluta reporta el valor máximo de ahuellamiento en la zona de influencia directa de las llantas, sin importar si este valor se encuentra al inicio, parte intermedia o final del tramo. De forma similar, la máxima deformación media es el valor máximo de ahuellamiento de los valores promedio para cada sección longitudinal. Por último, la deformación media del tramo corresponde al promedio de los valores promedio para las 64 secciones longitudinales que generan los perfilómetros del HVS.

Al cabo de 1 000 000 de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) (condición final), se logró obtener una máxima deformación absoluta de 6,36 mm, una máxima deformación media de 5,26 mm y una deformación media del tramo de 4,36 mm. Estas tres curvas de evolución de la deformación muestran esa condición creciente del ahuellamiento según aumenta el número de pasadas, donde la tendencia de las tres gráficas posee una tasa de crecimiento similar desde su condición inicial hasta final.

6.5.1.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

De igual forma que en la deformación permanente, el IRI se calcula a partir de los datos de desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento recolectados por los dos perfilómetros inerciales láser con los que cuenta el HVS (uno en cada extremo de las llantas). Sin embargo; en este caso los datos se procesan en el software PROVAL para obtener la regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal del tramo. A continuación, en la **Figura 95**, se muestra la evolución del IRI para el tramo 017 (tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PEAD sin acondicionamiento). Importante mencionar que solo se consideraron aquellos perfiles longitudinales dentro del área de influencia directa de las llantas (32 de los 64 disponibles, 16 a cada lado del eje de aplicación de carga del HVS).

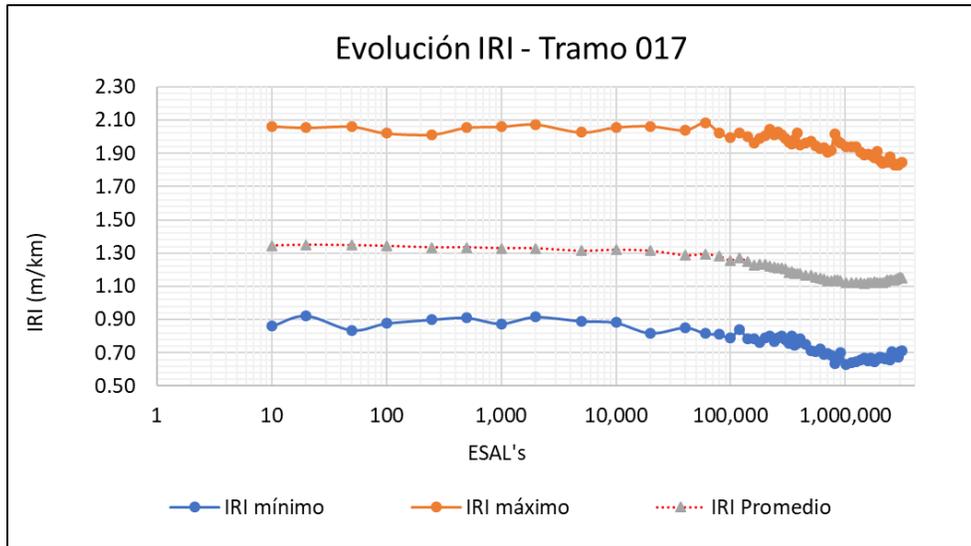


Figura 95. Evolución del Índice de rugosidad internacional para el tramo 017.

Para la condición final del tramo, al cabo de un millón de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) con el HVS, se obtuvieron valores de IRI menores respecto a su condición inicial. Según se muestra en la figura anterior, se obtuvo para la condición final un IRI de 0,71 como valor mínimo, 1,84 como máximo y 1,15 como valor promedio. Tanto para IRI mínimo y máximo se aprecia una tendencia constante que se mantiene hasta los 100 000 ESAL's para posteriormente adoptar una tendencia decreciente. Por otra parte, para el IRI promedio desde su condición inicial hasta final se aprecia una tendencia decreciente. La diferencia entre el valor final e inicial es de -0,13 para el IRI mínimo, -0,21 para la condición máximo y -0,20 en términos promedio.

6.5.1.4 Fricción

Para la determinación de la fricción, se realizó el método de prueba estándar del Péndulo Inglés. En la condición inicial del tramo se evaluaron 8 puntos cada 100 cm a lo largo de la zona interna del tramo 017; sin embargo, para la determinación del valor PTV de fricción (valor del ensayo del péndulo) solo se tomaron en cuenta 6 puntos (correspondientes a la zona interna del tramo en sentido del avance de la llanta). De esta forma, se obtuvo que el valor inicial (cero pasadas del HVS) de fricción es igual a 73. Por otra parte, para la



condición final se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona central del tramo; sin embargo, se tomaron en cuenta los 12 puntos centrales que representan la zona de influencia directa de la llanta del HVS. De esta forma, se obtuvo que el valor final (un millón de pasadas del HVS) de fricción es igual a 54. En términos generales, se observa una reducción de la fricción en 19 PTV para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PEAD sin acondicionamiento.

6.5.2 Mezcla con acondicionamiento por temperatura

6.5.2.1 Deflectometría

Los análisis fueron realizados por medio de Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) y el Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD, por sus siglas en inglés). A continuación, en la **Figura 96**, **Figura 97**, **Figura 98** y **Figura 99** se muestran cada uno de los cuencos de deflectometría para el tramo con acondicionamiento (tramo 021) en estado inicial o cero pasadas temperatura superficial del pavimento 21°C del simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) y en su estado final después de un millón de pasadas del HVS (temperatura superficial del pavimento 27,3°C).

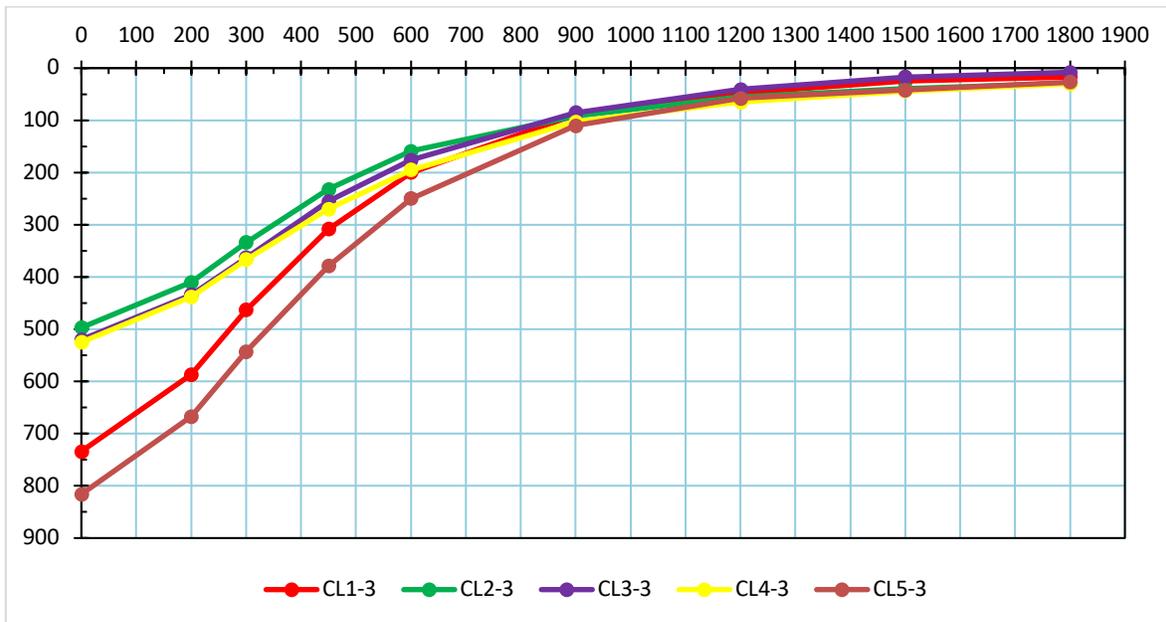


Figura 96. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 021 con acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

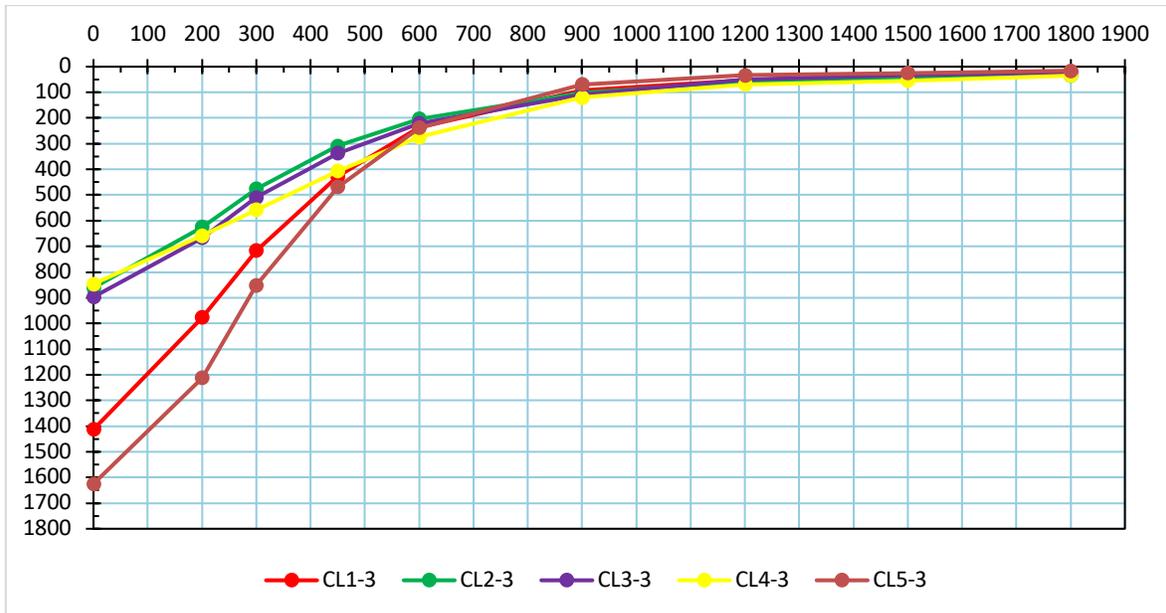


Figura 97. Cuenco de deflexiones (RSD) tramo 021 con acondicionamiento al millón pasadas de HVS.

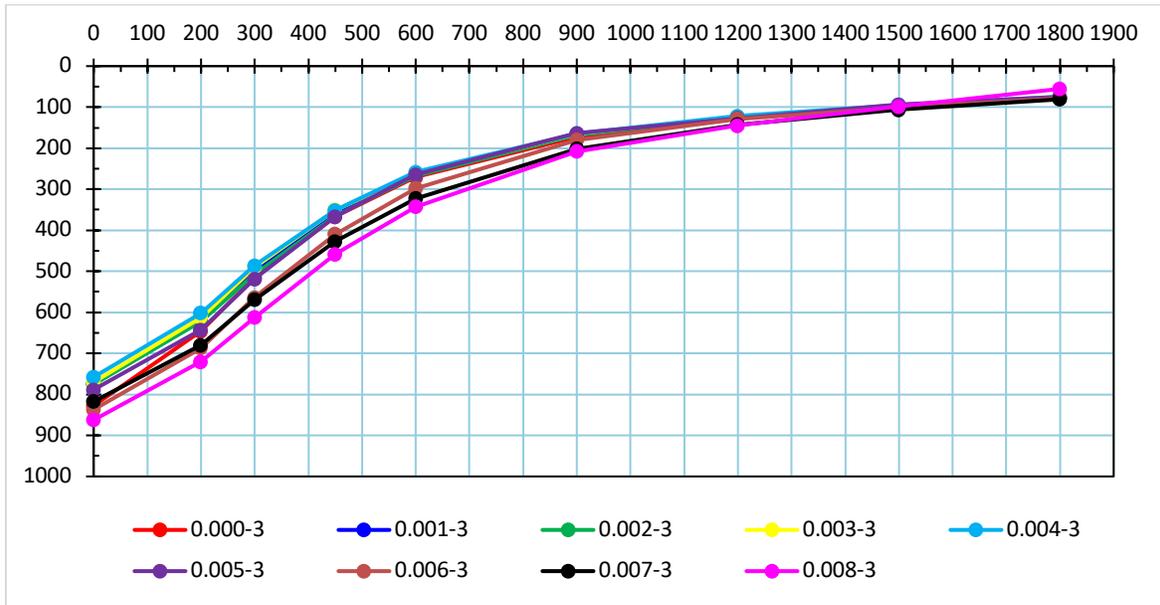


Figura 98. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 021 con acondicionamiento a cero pasadas de HVS.

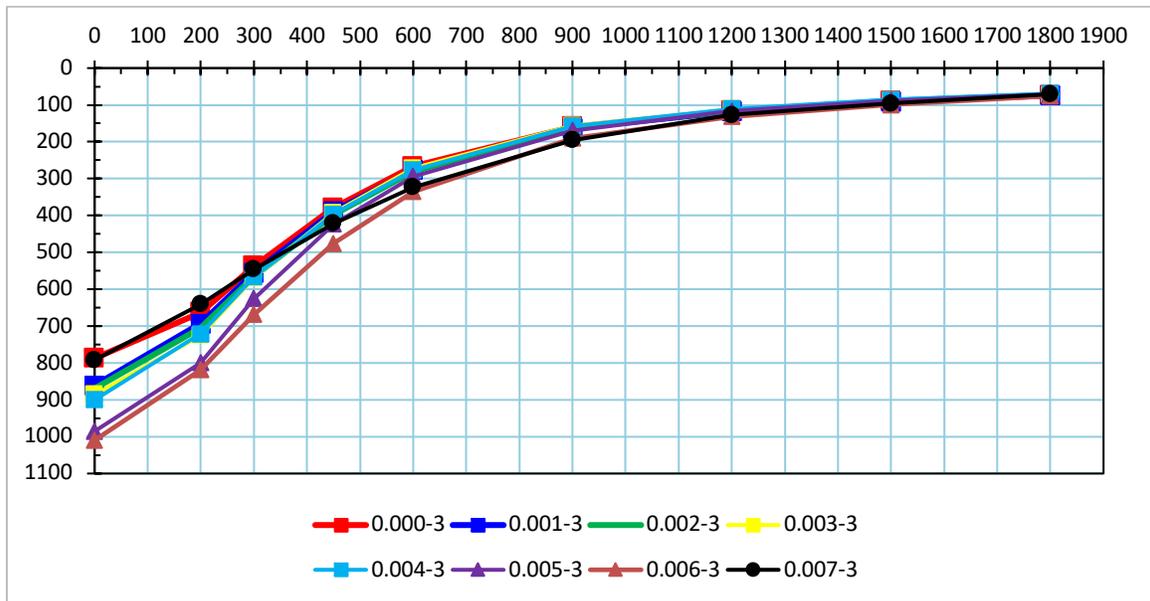


Figura 99. Cuenco de deflexiones (FWD) tramo 021 con acondicionamiento al millón pasadas de HVS.



De manera análoga con el tramo 017 (sin acondicionamiento) se realizó el análisis gráfico (ver **Figura 100**) para las deflexiones promedio en el tramo 021 con acondicionamiento por temperatura, el análisis incluye los datos de deflectometría realizado con el Deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés) para todas las estaciones y con el Deflectómetro de superficie de pavimento (RSD, por sus siglas en Inglés) para las estaciones externas de medición directa, CL1 y CL5.

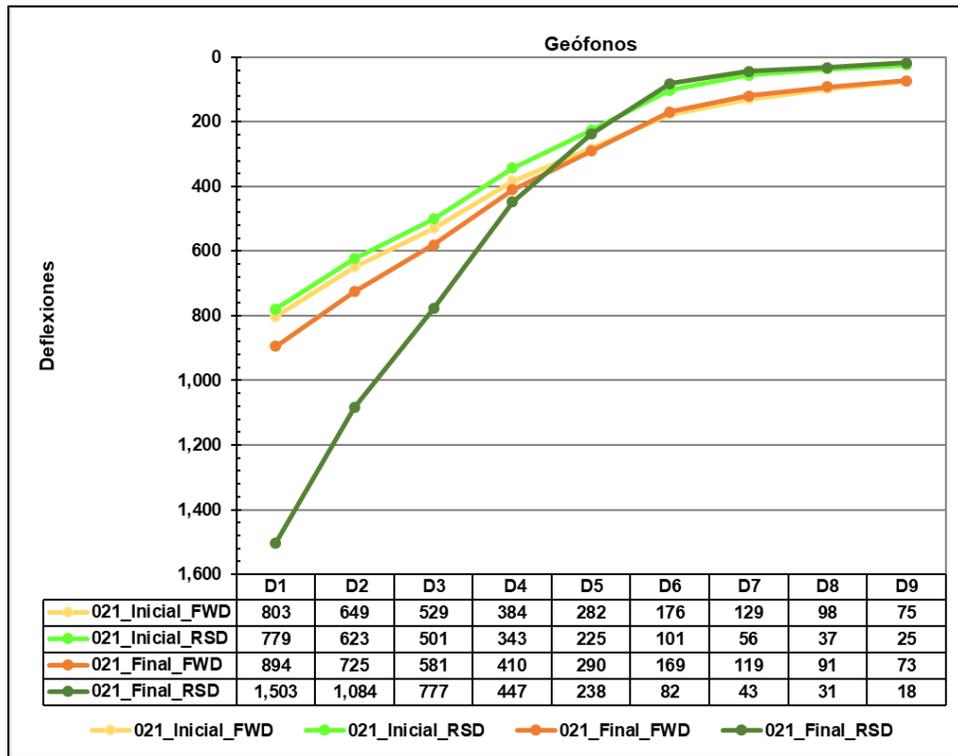


Figura 100. Deflexiones promedio FWD y RSD (CL1 y CL5) para tramo 021 inicial y final.

6.5.2.2 Deformación Permanente

Para determinar la evolución de la deformación permanente en la superficie del pavimento cada determinado número de ciclo, se utilizaron los dos perfilómetros laser con los que cuenta el HVS. De esta forma, el ahuellamiento se estima como la diferencia entre los puntos antes de aplicar carga (matriz base) y los puntos tomados después de cada ciclo de



carga de interés. A continuación, en la **Figura 101**, se muestra una vista tridimensional del cuenco de deformaciones, para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PEAD y acondicionamiento por temperatura en su estado final después de un millón de pasadas del HVS. Por otra parte, en la **Figura 102** se muestra el perfil transversal para el mismo tramo en cuestión, según los valores promedio para cada perfil longitudinal (64 perfiles longitudinales generados por el HVS). Por último, en la **Figura 103** se muestra la evolución de la deformación permanente.

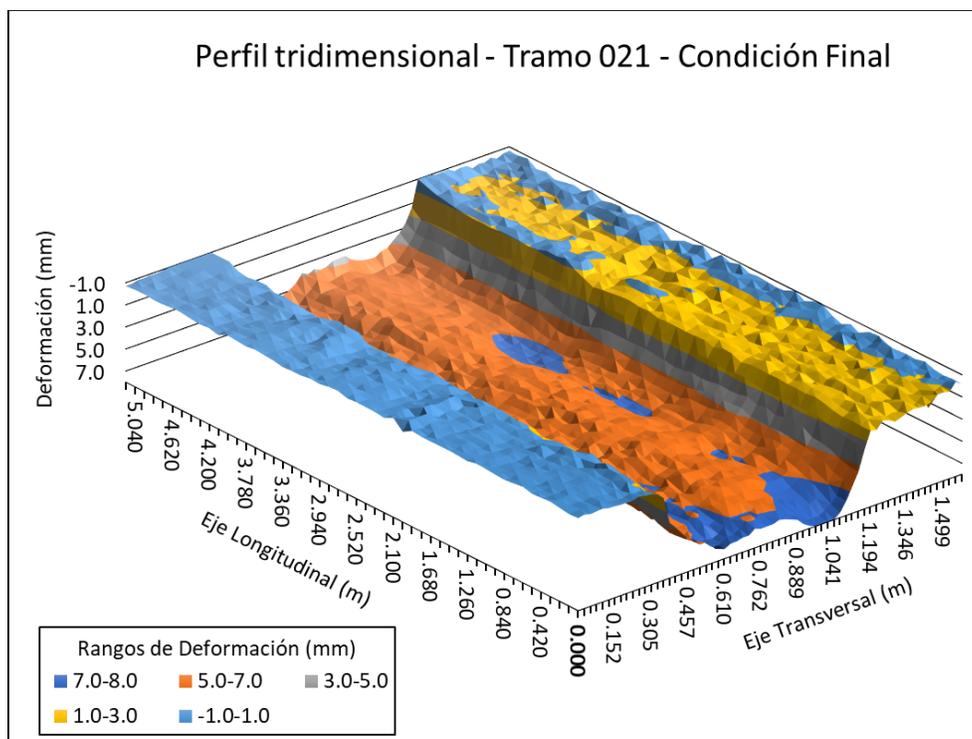


Figura 101. Perfil tridimensional deformado para el tramo 021 final.

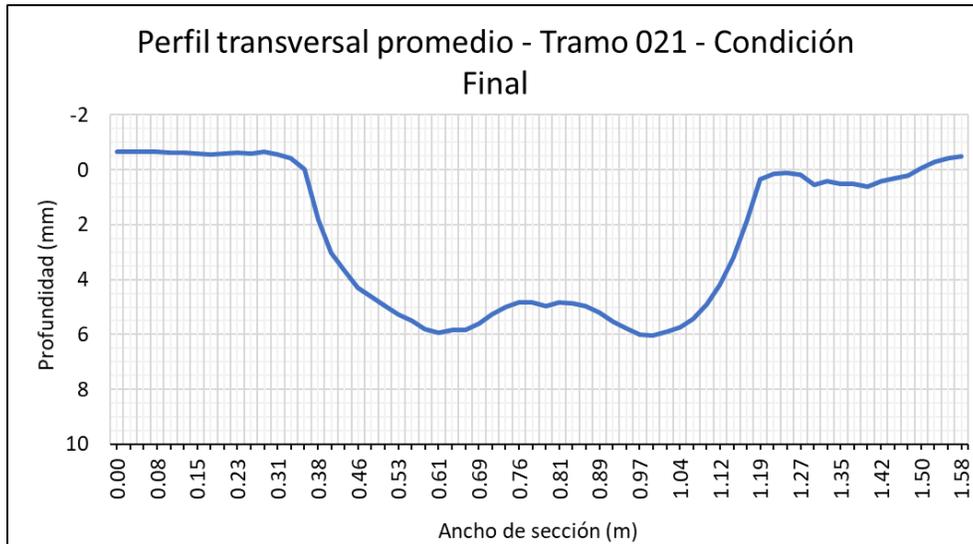


Figura 102. Perfil transversal promedio deformado para el tramo 021 final.

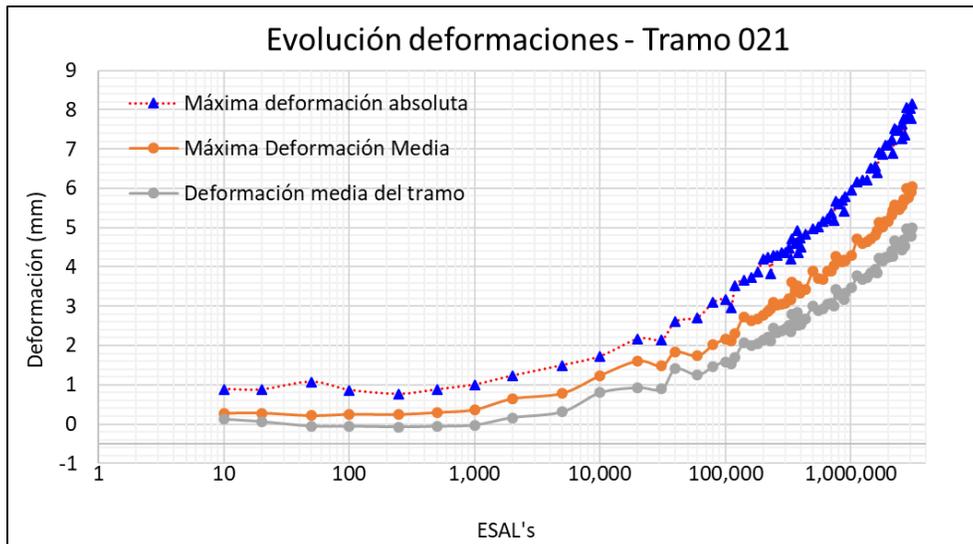


Figura 103. Evolución de las deformaciones para el tramo 021.

Según el perfil tridimensional, mostrado en la **Figura 101**, se aprecia cómo se acumula la mayor deformación permanente en los rangos de 5 mm a 7 mm en sentido del avance de la llanta. Sin embargo, también se aprecia una comulación de deformación permanente en el rango de 7 mm a 8 mm, en menor proporción y cercano a la cuota cero longitudinalmente



del tramo. Así mismo, en el perfil transversal promedio, presentado en la **Figura 102**, se observa como las mayores deformaciones acumuladas se ubican en la parte central de la sección alejado del centro con valores máximos que alcanzan los 6 mm.

Por otra parte, en el caso de la **Figura 103**, se muestran tres diferentes curvas. La curva de máxima deformación absoluta reporta el valor máximo de ahuellamiento en la zona de influencia directa de las llantas, sin importar si este valor se encuentra al inicio, parte intermedia o final del tramo. De forma similar, la máxima deformación media es el valor máximo de ahuellamiento de los valores promedio para cada sección longitudinal. Por último, la deformación media del tramo corresponde al promedio de los valores promedio para las 64 secciones longitudinales que generan los perfilómetros del HVS.

Al cabo de 1 000 000 de repeticiones (condición final), se logró obtener una máxima deformación absoluta de 8,13 mm, una máxima deformación media de 6,04 mm y una deformación media del tramo de 4,99 mm. Estas tres curvas de evolución de la deformación muestran esa condición creciente del ahuellamiento según aumenta el número de pasadas, donde la tendencia de las tres gráficas posee una tasa de crecimiento similar desde su condición inicial hasta final.

6.5.2.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

De igual forma que en la deformación permanente, el IRI se calcula a partir de los datos de desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento recolectados por los dos perfilómetros inerciales láser con los que cuenta el HVS (uno en cada extremo de las llantas). Sin embargo; en este caso los datos se procesan en el software PROVAL para obtener la regularidad superficial, tanto longitudinal como transversal del tramo. A continuación, en la **Figura 104**, se muestra la evolución del para el tramo 021 (tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PEAD y acondicionamiento por temperatura). Es importante mencionar que solo se consideraron aquellos perfiles longitudinales dentro del área de influencia directa de las llantas (32 de los 64 disponibles, 16 a cada lado del eje de aplicación de carga del HVS).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 152 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

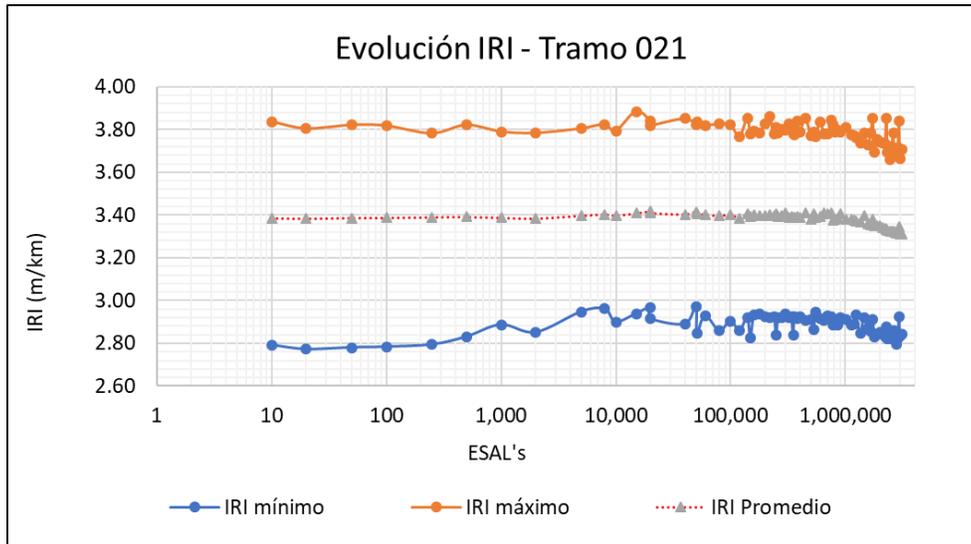


Figura 104. Evolución del Índice de rugosidad internacional para el tramo 021.

Para la condición final del tramo, al cabo de un millón de repeticiones con el HVS, se obtuvieron valores de IRI menores respecto a su condición inicial. Según se muestra en la figura anterior, se obtuvo para la condición final un IRI de 2,84 como valor mínimo, 3,70 como máximo y 3,31 como valor promedio. Tanto para IRI máximo y promedio se aprecia una tendencia constante que se mantiene hasta los 100000 ESAL's para posteriormente adoptar una tendencia decreciente. Por otra parte, respecto al IRI mínimo, desde su condición inicial hasta los 100000 ESAL's no posee una tendencia bien definida; sin embargo, posteriormente también presenta una tendencia decreciente. La diferencia entre el valor final e inicial es de 0,003 para el IRI mínimo, 0,19 para la condición máximo y 0,10 en términos promedio.

6.5.2.4 Fricción

Para la determinación de la fricción, se realizó el método de prueba estándar del Péndulo Inglés. En la condición inicial del tramo se evaluaron 8 puntos cada 100 cm a lo largo de la zona interna del tramo 021; sin embargo, para la determinación del valor PTV de fricción (valor del ensayo del péndulo) solo se tomaron en cuenta 6 puntos (correspondientes a la zona interna del tramo en sentido del avance de la llanta). De esta forma, se obtuvo que el



valor inicial (cero pasadas del HVS) de fricción es igual a 75. Por otra parte, para la condición final se evaluaron 16 puntos cada 50 cm a lo largo de la zona central del tramo; sin embargo, se tomaron en cuenta los 12 puntos centrales que representan la zona de influencia directa de la llanta del HVS. De esta forma, se obtuvo que el valor final (un millón de pasadas del HVS) de fricción es igual a 55. En términos generales, se observa una reducción de la fricción en 20 PTV para el tramo de mezcla asfáltica con 1,0% de PEAD y acondicionamiento por temperatura.

6.6 Retrocálculo de módulos

El proceso de retrocálculo de módulos se realiza con el principal objetivo de evaluar el desempeño estructural de cada una de las capas que constituyen el pavimento flexible de las pistas experimentales, y se efectuó a través de la estimación de los módulos de materiales a nivel de mezcla asfáltica, base, subbase y subrasante. Los cálculos fueron efectuados para las condiciones de pavimento nuevo (recién construido) y posterior a la aplicación de aproximadamente 1 millón de repeticiones (3,2 millones de ESAL's) del Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés).

El retrocálculo de los módulos se desarrolló en dos etapas, la primera consistió en la medición del cuenco de deflexiones con Deflectómetro de Impacto (FWD, por sus siglas en inglés), como se indicó en los apartados de deflectometría en tramos mostrados anteriormente. En el segundo paso se estimaron los módulos de capas empleando el Software ELMOD6 (Dynatest), usando el método de multicapa elástica. Los resultados de los procesos de retrocálculos mediante las salidas del FWD se presentan a continuación en la Tabla 39,

Tabla 40 y Tabla 41 para los tramos de control, tramos con mezcla asfáltica con PET y tramos con mezcla asfáltica con PED respectivamente.



Tabla 39. *Retrocálculo de módulos para los tramos de control.*

Tramo de evaluación	Capa	Espesor (mm)	Promedio módulo calculado (MPa)	
			Inicial	Final
15	HMA	100	3249	1530
	GB	200	99	100
	GSB	300	56	36
	SG	-	44	47
19	HMA	100	3370	3259
	GB	200	98	98
	GSB	300	63	63
	SG	-	43	43

Tabla 40. *Retrocálculo de módulos para tramos modificados con PET.*

Tramo de evaluación	Capa	Espesor (mm)	Promedio módulo calculado (MPa)	
			Inicial	Final
16	HMA	100	2266	1887
	GB	200	82	55
	GSB	300	80	51
	SG	-	47	40
20	HMA	100	2329	2342
	GB	200	101	68
	GSB	300	86	67
	SG	-	43	47



Tabla 41. *Retrocálculo de módulos para tramos modificados con PEAD.*

Tramo de evaluación	Capa	Espesor (mm)	Promedio módulo calculado (MPa)	
			Inicial	Final
17	HMA	100	2332	2040
	GB	200	99	74
	GSB	300	81	64
	SG	-	50	48
21	HMA	100	2578	2490
	GB	200	95	68
	GSB	300	87	68
	SG	-	44	49

6.7 Desempeño de las mezclas

Se realizaron ensayos de desempeño para analizar el comportamiento de las mezclas ante diferentes condiciones, como lo son: daño por humedad, susceptibilidad a la fatiga y susceptibilidad a la deformación permanente, el detalle de estos resultados se muestra en el Anexo 10.

En la *Tabla 42*, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en estas pruebas. Es de apreciar, que a pesar de que se detectaron diferencias en el porcentaje de asfalto en las mezclas: 5,76% para el control, 6,08% para 1% PET y de 5,28% para 1% PEAD (resultados según extracción en campo mediante bloques y núcleos Informe INF-0105-2023); las resistencias retenidas fueron mayores al valor especificado de 75% y en todos los casos mayores a 80% (mezcla A y B según CR-2020) en todos los casos.

En cuanto a los resultados de rueda de Hamburgo, no existe especificación para mezclas AB, sin embargo, si se toma como referencia el valor de 6 mm, especificado para mezclas tipo C y D, las tres mezclas están por debajo de este valor. Si consideramos los valores

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 156 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



entre ellos, el más alto fue el de la mezcla modificada por PEAD y el mejor la mezcla modificada con PET.

Tabla 42. *Desempeño de las mezclas analizadas*

Variable	Control	1%PET	1%PEAD
Resistencia retenida (%)	83,7	82,6	91,7
Flow Number (ciclos)	531	2,694	1,586
APA (mm)	1.962	1.214	1.694
Rueda de Hamburgo	-2.596	-2.003	-3.455
Fatiga 400 μ Strains	145,153	105,637	107,960
Fatiga 600 μ Strains	14,764	15,047	21,355

Respecto a los resultados de APA, tenemos un comportamiento similar, con valores límites de 3,5 mm para mezclas C y D, como se observa en la tabla anterior todas las mezclas poseen valores inferiores, en este caso el valor más alto fue para la mezcla de control y el menor para la mezcla modificada con 1% de PET.

No se tiene especificación para ciclos a fatiga en mezcla A y B, sin embargo, podemos comparar los valores obtenidos entre las tres mezclas. En el Anexo 10, se muestran los resultados de comparación de medias para la fatiga a 400 μ s, y 600 μ s, en donde se puede concluir que no existe diferencia estadística entre los resultados de fatiga para las tres mezclas, sin embargo, las respuestas obtenidas no las posiciona como mezclas de alto desempeño al fisuramiento por fatiga correspondientes a los requisitos de las mezclas C y D.



7 ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 Deflectometría

Posterior a los procedimientos de análisis de deflectometría realizados sobre cada uno de los tramos HVS por medio de las dos metodologías empleadas, se procedió a realizar diferentes análisis estadísticos sobre la base de datos que se obtuvo. Primero, se realizaron análisis de varianza sobre los resultados generales de deflectometría tomando en cuenta las dos metodologías (FWD y RSD), y por último se realizaron análisis de varianza para las respuestas de FWD para cada uno de los tramos en sus dos estados de evaluación del pavimento, estado inicial a cero pasadas del HVS y final después de un millón de pasadas del HVS.

7.1.1 Comparaciones entre mediciones de deflectometría FWD y RSD

Dentro del análisis comparativo de los datos de deflectometría para ambas metodologías, se realizó por medio del Análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor para cada uno de los casos y fue desarrollado utilizando el software estadístico Minitab versión 2019.

El análisis de Varianza (ANOVA) fue realizado para cada uno de los tramos, en cada una de las condiciones del pavimento (condiciones iniciales y finales), se compararon las deflexiones en los geófonos externos (D1 y D9) y también para los geófonos intermedios (D4 y D6). Cada una de las salidas de los ANOVA se reunieron en el Anexo 7 y el análisis final realizado por medio de la prueba Tukey se muestra en la **Tabla 43**, donde se establece la comparación y se analiza las medias para cada uno de los grupos de datos, determinando como respuesta final si es que la respuesta de deflectometría FWD (todos los puntos) puede ser comparable con la respuesta de deflectometría RSD (puntos CL1 y CL5), cuando se analiza un mismo tramo y a una misma condición de pavimento.



Tabla 43. Análisis estadístico (ANOVA) comparativo de deflectometría FWD y RSD.

Tramo	Condición	Geófonos			
		D1	D4	D6	D9
015	Inicial	I	D	D	D
	Final	D	I	D	D
016	Inicial	I	D	D	D
	Final	D	D	D	D
017	Inicial	I	D	D	D
	Final	D	I	D	D
019	Inicial	D	D	D	D
	Final	D	D	D	D
020	Inicial	D	D	D	D
	Final	D	I	D	D
021	Inicial	I	D	D	D
	Final	D	D	D	D

Leyenda: I – Misma agrupación en Análisis Tukey

D – Diferente agrupación en Análisis Tukey

De la tabla de resultados antes expuesta, se puede concluir que de forma general para estas condiciones en particular de los tramos HVS y de los materiales utilizados, las metodologías de análisis de deflectometría antes mencionadas, no pueden ser comparadas entre sí. Cada uno de los análisis de comparación en pareja Tukey, muestran como resultado final que los datos analizados en cada una de las condiciones del pavimento (inicial y final) presentan comportamientos estadísticamente distintos entre metodologías,



por lo cual en la mayoría del total de comparaciones antes realizadas se concluye que la metodología de deflectometría FWD no puede ser comparada con la metodología RSD.

Es importante resaltar que, la conclusión realizada anteriormente es aplicable para las condiciones en particular de todos los tramos HVS, es decir, desde los materiales utilizados y el producto final de cada uno. Se recomienda realizar más investigación al respecto y se hace hincapié de que los resultados mostrados anteriormente no son absolutos o determinantes para todos los casos de estudio.

7.1.2 Módulos retrocalculados

De acuerdo con los resultados antes obtenidos y debido a la particularidad de los datos obtenidos con RSD, se decidió centrar el análisis en todos los resultados de deflectometría (FWD) analizados por medio del Deflectómetro de impacto. Se realizaron ANOVA's sobre los promedios aritméticos de valores de módulos para cada una de las estaciones en cada uno de los tramos. Es importante indicar que para los análisis en cada tramo se desestimaron las estaciones hacia el extremo de cada sección de control, para eliminar posibles efectos de borde en la aplicación de carga, estos resultados se muestran en el Anexo 8.

Como resultado final de los análisis de varianza (para la MAC) realizados mediante la comparación de pareja Tukey se muestra el resultado directo del análisis de varianza (ANOVA) realizado en el software Minitab en la **Figura 105** y la **Tabla 44** donde se muestra la interacción entre cada uno de los tramos, en ambas condiciones iniciales y finales, de acuerdo con los valores de módulo promedio. La cantidad de grupos generados para todos los datos fueron 5, donde muchos de los tramos comparten 2 o más de 2 grupos a la vez debido a la naturaleza de los datos y el tamaño de cada intervalo de agrupación.

Es de apreciar que la mezcla de control (sin acondicionar) presentó un comportamiento típico, ya que el módulo de la MAC pasó de 3.217 MPa a 1.461 MPa, con un módulo residual del 44% del módulo inicial, sin embargo, en el resto secciones la pérdida de rigidez en la



MAC, fue mucho menor, ya sea porque el módulo inicial fue mucho menor o porque el acondicionamiento térmico trasladó el daño a otras capas.

```

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Tramos N   Media Agrupación
T19_F  6  3459.5 A
T19_I  7  3297.7 A
T15_I  7  3217.7 A B
T21_I  7  2630.9 B C
T21_F  6  2549.8 B C
T20_I  7  2422.3 C D
T17_I  7  2336.9 C D
T20_F  7  2304.1 C D
T16_I  7  2248.4 C D
T17_F  6  2023.0 C D E
T16_F  6  1767.5 D E
T15_F  6  1460.7 E

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Intervalos de confianza simultáneos de Tukey del 95%
Todas las comparaciones de dos a dos entre los niveles de Tramos

Nivel de confianza individual = 99.88%

```

Figura 105. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de módulos promedio para FWD.

En la **Tabla 44** se muestra un análisis comparativo para los módulos de la MAC, es de apreciar que, en esta matriz, las casillas que comparten letra indican que los módulos de la MAC son estadísticamente iguales. Es de apreciar en términos generales, que el esquema de carga actual no provocó un daño cuantificable en la mezcla asfáltica para los tramos acondicionados (temperatura) y para las mezclas modificadas. Es importante indicar que para todos los tramos se está observado el módulo a la misma temperatura (normalizado a 21 °C), medido sobre el tramo a temperatura ambiente. Sin embargo, el daño ejercido sobre tramo (producto de las cargas) se da a la temperatura correspondiente, temperatura ambiente para los tramos sin acondicionar (21 - 23 °C) y máxima de 42 °C para los tramos acondicionados (ciclos diarios de 21- 40 °C).

Por lo tanto, se puede observar que en el tramo de control a temperatura ambiente sí se detectó una pérdida de rigidez en las MAC, que puede asociarse con un daño en el material,



que según lo esperado se traduciría en fatiga en la MAC, que tiende a ser crítica a esta temperatura. Sin embargo, en el caso de las mezclas modificadas no se observó este patrón, pero debemos considerar que el módulo inicial es mucho menor, por lo que se podría esperar una falla más dúctil en el material. La misma consideración aplicaría para las mezclas ensayadas de forma acondicionada.

Por lo tanto, es importante considerar extender el periodo de carga en estos mismos tramos, para provocar un mayor daño en el material, que permita ver la tendencia de este, comprender mejor, aspectos como, la resiliencia del material con la temperatura, mayor ductilidad en la falla de este material y detectar como mayor precisión que capas están concentrando más daño respecto a capas superficiales o más profundas.

Tabla 44. Análisis estadístico (ANOVA) comparativo de módulos promedio para FWD.

Tramo		015		016		017		019		020		021	
		Inicial	Final										
015	Inicial	A-B						A	A			B	B
	Final		E		E		E						
016	Inicial			C-D	D	C	C			C	C	C	C
	Final		E	D	D-E	D	D			D	D		
017	Inicial			C	D	C-D	C			C	C	C	C
	Final		E	C	D	C	C-D-E			C	C	C	C
019	Inicial	A						A	A				
	Final	A						A	A				
020	Inicial			C	D	C	C			C-D	C	C	C
	Final			C	D	C	C			C	C-D	C	C



Tramo		015		016		017		019		020		021	
		Inicial	Final										
021	Inicial	B		C		C	C			C	C	B-C	B
	Final	B		C		C	C			C	C	B	B-C

7.2 Deformación Permanente

En la **Figura 106** se muestra el resultado del análisis de varianza (ANOVA) realizado en el software Minitab, utilizando la prueba de comparación de medias Tukey, para la deformación promedio de cada tramo, como la media aritmética de los 1600 puntos medidos dentro de la zona de ensayo. Es de apreciar que la media de ahuellamiento promedio estuvo muy lejana al criterio de falla definido de 12 mm para los tramos sin acondicionar y de 16 mm para los tramos acondicionados. Como puede observarse, los valores medios son muy bajos. Resulta interesante observar como la mezcla de control presentó el mayor cambio, pasando de los 3,8 mm, sin acondicionar a los 5,1 mm acondicionada.

La pista que presentó un mayor ahuellamiento fue la mezcla modificada con 1 % PET, ya que se obtuvo un valor de 5,8 mm sin acondicionamiento. Esta fue la única que presentó un valor mayor sin acondicionar que acondicionada, lo cual resulta contradictorio ya que a mayor temperatura se espera mayores tasas de deformación plástica. Esto puede explicarse de cierta manera si se considera que este tramo fue el que presentó la mayor tasa de desprendimiento de residuos durante el ensayo, el cual fue de hasta un 2 % del peso total de mezcla del tramo, lo que supera por más del doble a los valores obtenidos en el tramo modificado por PEAD, aunque es necesario profundizar en esta variable para cuantificar mejor este efecto.

Es importante aclarar que, aunque estadísticamente se tengan diferencias (debido a la gran cantidad de puntos y alta resolución del equipo), en términos prácticos todas las mezclas



presentaron ahuellamientos bastante bajos y muy por debajo de los umbrales de falla, lo cual indica un muy buen desempeño a la deformación. El desprendimiento observado de residuos resultó ser un factor adicional que estará siendo analizado con mayor profundidad en el proyecto UNAT-2021-01, en el cual se determinará si existe presencia de micro plásticos en estos residuos desprendidos y su posible impacto ambiental en el caso de estar presentes.

```

Grouping Information Using Fisher Method

Tramo      N      Mean  Grouping
T016      1600   5.792   A
T019      1600   5.120   B
T021      1600   4.990   C
T017      1600   4.355   D
T020      1600   4.151   E
T015      1600   3.823   F

Means that do not share a letter are significantly different.

```

Figura 106. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo global para el ahuellamiento promedio del tramo.

En la Figura 107 y Figura 108 se muestra el mismo análisis, pero, realizado por tratamientos, donde se observa que cuando la mezcla está a temperatura ambiente el tramo que se comportó mejor fue la mezcla de control y la que tuvo mayor ahuellamiento fue la mezcla modificada con 1,0% de PET, pero en este caso no se podría inferir si el ahuellamiento fue mayor por la pérdida de material o por mayores deformaciones plásticas. En el caso de las mezclas acondicionadas, la tasa de desprendimiento fue mucho menor (0,17 % para PEAD y 0,77 % para PET del volumen total) y en este caso la mezcla de control fue la obtuvo el mayor valor promedio, frente a las mezclas modificadas.

```

Grouping Information Using Fisher Method

Tramo      N      Mean  Grouping
T016      1600   5.792   A
T017      1600   4.355   B
T015      1600   3.823   C

Means that do not share a letter are significantly different.

```



Figura 107. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de los tramos sin acondicionamiento para el ahuellamiento promedio del tramo.

Grouping Information Using Fisher Method			
Tramo	N	Mean	Grouping
T019	1600	5.120	A
T021	1600	4.990	B
T020	1600	4.151	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 108. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de los tramos acondicionados para el ahuellamiento promedio del tramo.

7.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

Las mediciones obtenidas del índice de regularidad internacional son bastante complejas de analizar, debido a que este valor es muy susceptible a pequeñas deformaciones en distancias cortas. Lo cual fue un factor determinante en las pistas de ensayo construidas. Se pudo observar que, debido a factores constructivos no controlados durante la fase de extendido, colación o compactación de alguna de las capas inferiores, se obtuvieron valores de IRI muy variables, que pueden afectar las tasas de daño en variables como la pérdida de rigidez o el ahuellamiento, ya que pavimentos con menores valores de IRI, tienden a mantenerse en mejor condición por más tiempo.

Por la tanto, conociendo esto podemos observar las mediciones de la Figura 109, donde se observa que las mediciones más altas de IRI promedio se obtuvieron en los tramos 015 y 016 (control y modificada con 1,0 % de PET, sin acondicionar). Solo en estos tramos con valores de IRI mayores a 6 m/km se pudo ver una evolución o aumento de la irregularidad al final del ensayo en esta primera etapa, con aumentos muy leves pero significativos estadísticamente.

Los demás tramos con valores de IRI cercanos de a 3m/km o incluso menores de 2 m/km, no lograron superar la tasa de post-compactación, donde se prevé un leve descenso de los valores de IRI antes de aumentar. Esto es un indicador de una baja tasa de deterioro



inducido en el tramo, lo cual es consecuente con los tramos que presentaron una mayor pérdida de rigidez, más no con los tramos con mayor ahuellamiento por carga. Sin embargo, estos resultados no son concluyentes y es necesario aumentar las repeticiones de carga sobre los tramos para aumentar el nivel deterioro y capturar de una mejor forma la evolución y tendencia del daño en cada uno de los tramos.

```

Grouping Information Using Fisher Method

Código
Control  N   Mean  Grouping
T015_F  32  7.0285  A
T016_F  32  6.6073  B
T015_I  32  6.5477  B
T016_I  32  6.2075  C
T020_I  32  3.7213  D
T020_F  32  3.4313  E
T019_I  32  3.4133  E
T019_F  32  3.3104  E
T021_I  32  2.1236  F
T021_F  32  1.7236  G
T017_I  32  1.3447  H
T017_F  32  1.1479  I

Means that do not share a letter are significantly different.

```

Figura 109. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo global para el IRI promedio de cada tramo.

En la **Figura 110** y **Figura 111** se muestra en detalle los tramos sin acondicionamiento térmico y los acondicionados, respectivamente, para las condiciones iniciales y finales. De forma consistente se observó que los tramos ubicados en el sector noroeste obtuvieron peores valores de IRI inicial, mientras que los tramos ubicados en el sector sureste los valores más bajos. Sin embargo, en todos los casos, los aumentos en los tramos en los que si se evidenció fueron muy bajos y es necesario aumentar la cantidad de repeticiones para observar: la tendencia de daño, evidenciar daño en los tramos de menor IRI y poder calcular la tasa de aumento en la zona creciente de daño.



```

Grouping Information Using Fisher Method

Código
Control  N   Mean  Grouping
T015_F  32  7.0285  A
T016_F  32  6.6073  B
T015_I  32  6.5477  B
T016_I  32  6.2075  C
T017_I  32  1.3447  D
T017_F  32  1.1479  E

Means that do not share a letter are significantly different.

```

Figura 110. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de los tramos sin acondicionamiento para el IRI promedio de cada tramo.

```

Grouping Information Using Fisher Method

Código
Control  N   Mean  Grouping
T020_I  32  3.7213  A
T020_F  32  3.4313  B
T019_I  32  3.4133  B
T019_F  32  3.3104  B
T021_I  32  2.1236  C
T021_F  32  1.7236  D

Means that do not share a letter are significantly different.

```

Figura 111. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de los tramos acondicionados para el IRI promedio de cada tramo.

7.4 Resistencia al deslizamiento

Los valores de resistencia al deslizamiento son un factor de suma importancia en la seguridad vial, ya que valores bajos pueden implicar un riesgo mayor a sufrir accidentes por pérdida de tracción entre las llantas del vehículo y la carretera. Este un factor relacionado directamente con la mezcla asfáltica, por lo tanto, uno de los aspectos a comprobar es que el modificante no afecte negativamente este parámetro.



En la **Figura 112** se pueden observar los valores promedio para cada sección de control, antes del ensayo y al final del esquema de carga. Como es de esperar todos los tramos poseen valores estadísticamente mayores antes del ensayo que después del ensayo, ya que el desgaste y post-compactación provocado por las llantas afecta la macro-textura y por lo tanto la resistencia al deslizamiento. Es importante aclarar que los resultados marcados con “***”, corresponde a mediciones del pavimento sin ensayar, pero medidos en la zona externa del tramo, sobre la misma mezcla en estudio.

Grouping Information Using Fisher Method			
Condición	N	Mean	Grouping
T21_I	6	75.000	A
T17_I	6	73.167	A B
T16_I***	12	72.167	A B
T20_I***	13	72.015	A B
T19_I	6	71.500	A B
T15_I***	12	69.583	B
T19_F	12	59.000	C
T21_F	11	55.455	D
T17_F	12	53.750	D
T15_F	6	47.833	E
T16_F	6	45.167	E
T20_F	12	44.417	E

Figura 112. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo global para la resistencia al deslizamiento promedio de cada tramo.

Observando la **Figura 113** y **Figura 114** podemos inferir que no existe la suficiente evidencia estadística de que el modificante afecte negativamente la resistencia al deslizamiento. Sin embargo, si se pudo observar una leve tendencia a valores finales más altos en la mezcla modificada con 1,0 % de PEAD (respecto al control) y una leve tendencia a valores finales más bajos en la mezcla modificada con 1,0 % de PET (respecto al control). Estudios posteriores deberán centrarse en investigar con mayor profundidad esta variable.



Control	N	Mean	Grouping
T17_I	6	73.167	A
T16_I**	12	72.167	A B
T15_I**	12	69.583	B
T17_F	12	53.750	C
T15_F	6	47.833	D
T16_F	6	45.167	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 113. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de los tramos sin acondicionamiento para la resistencia al deslizamiento de cada tramo.

Grouping Information Using Fisher Method			
Código	N	Mean	Grouping
Control	6	75.000	A
T21_I	6	75.000	A
T20_I**	13	72.015	A
T19_I	6	71.500	A
T19_F	12	59.000	B
T21_F	11	55.455	C
T20_F	12	44.417	D

Figura 114. Resultado Minitab ANOVA para análisis comparativo de los tramos acondicionados para la resistencia al deslizamiento de cada tramo.



8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se describió el proceso que se requiere para modificar, a escala industrial, las mezclas asfálticas con plásticos de desechos. Se incluyeron recomendaciones generales para el tratamiento durante el secado y calentamiento de los agregados. Adicionalmente, se describieron todas las etapas desarrolladas durante el proceso de construcción de las pistas experimentales.
- Previo a la incorporación del material de desecho a la mezcla asfáltica de forma masiva, se requiere de un análisis más exhaustivo para la validación del posible modificante para mezcla asfáltica, principalmente a nivel diseño de laboratorio para cumplir con especificación. Estudios posteriores deberán centrarse en validar el mejor método de diseño para la mezcla asfáltica ya que el tamaño de partícula del plástico es una variable muy importante para garantizar una correcta incorporación.
- Se modificó la mezcla asfáltica con un 1 % de material de desecho por vía seca: el material de desecho se incorporó como un agregado adicional durante el proceso de producción de la mezcla. La dosificación de 1 % de material de desecho, fue realizado sobre el peso de la mezcla asfáltica como adicional.
- La dosificación del agregado se realizó por peso en planta en el punto de incorporación de agregado RAP, para evitar la exposición directa del material de desecho con la llama del tambor mezclador. La planta utilizada para la producción de la mezcla es del tipo híbrido donde el mezclado es realizado como en una planta de bache.
- No se realizaron modificaciones al procedimiento de colocación de la mezcla asfáltica modificada. Tanto los paños de control, como los modificados con materiales de desecho fueron colocados y compactados de la misma forma.



- Se realizó un muestreo de los materiales colocados, el cual muestra porcentajes de asfalto más bajos y con alta variabilidad a los del diseño en algunos casos, entre 5,28 % y 6,08 % para las mezclas de PEAD y PET, respecto a los 5,76 % de la mezcla de control.
- La mezcla de control sin acondicionar presentó un comportamiento típico, ya que el módulo resiliente de la MAC pasó de 3217 MPa a 1461 MPa, después de su fase de ensayo, con un módulo residual del 45 %, sin embargo, en el resto secciones la pérdida de rigidez en la MAC fue mucho menor, ya sea porque el módulo inicial fue menor o porque el acondicionamiento térmico trasladó el daño a otras capas.
- Para la mezcla modificadas con PET sin acondicionar la reducción de módulo fue de 2248MPa a 1767 MPa y para la mezcla con PEAD y otros plásticos fue de 2236 MPa a 2023 MPa, sin que se evidenciara efectos adversos a la carga aplicada.
- La media de ahuellamiento promedio estuvo muy lejana al umbral definido de 12,5 mm para los tramos sin acondicionar y de 16,5 mm para los tramos acondicionados, lo que evidencia que para las cargas aplicadas de 3,2 millones de ESALs la mezcla presenta un comportamiento poco susceptible a la deformación permanente.
- Aunque estadísticamente se tengan diferencias en el valor medido de ahuellamiento, en términos prácticos todas las mezclas presentaron ahuellamientos bastante bajos y muy por debajo de los umbrales de falla, lo cual indica un muy buen desempeño a la deformación.
- Se observó que los tramos 15 y 16 obtuvieron valores de IRI inicial más altos, mientras que los tramos ubicados en el sector sureste, los valores más bajos. Sin embargo, en todos los casos los aumentos (productos de la carga externa) en los tramos en los que sí se evidenció fueron muy bajos y es necesario aumentar la



cantidad de repeticiones para observar: la tendencia de daño, evidenciar daño en los tramos de menor IRI y poder calcular la tasa de aumento en la zona creciente de daño.

- Los tramos que tuvieron mejor regularidad inicial (valores más bajos) presentaron tasas de aumento de la regularidad más bajas que aquellos con regularidades altas, (se evidenció una reducción de módulos mayor en tramos con mayor irregularidad) dado que este parámetro está relacionado con costos de operación se evidencia la importancia de mejorar los procesos constructivos por sus efectos en la regularidad y en los gastos de los usuarios.
- Respecto a la resistencia al deslizamiento, se puede inferir que no existe la suficiente evidencia estadística para evidenciar que el modificante afecte negativamente esta variable. Sin embargo, si se pudo observar una leve tendencia a valores finales más altos (mejores) en la mezcla modificada con 1,0 % de PEAD (respecto de las de control) y una leve tendencia a valores finales más bajos (peores) en la mezcla modificada con 1,0 % de PET (respecto de la de control). Estudios posteriores deberán centrarse en investigar con mayor profundidad esta variable, ya que las variaciones podrían deberse a variaciones en los contenidos de asfalto de las diferentes mezclas.
- Los resultados obtenidos en las pruebas de desempeño a nivel de laboratorio (RT, RH, APA y Fatiga), muestran que no existe diferencia significativa entre las mezclas, las tres (Control, PET y PEAD) poseen un excelente comportamiento a la deformación permanente y no existe diferencia estadística entre los valores obtenidos para ciclos a fatiga.
- Se deben realizar estudios más específicos a nivel de diseño de la mezcla a nivel de laboratorio, considerando los diferentes materiales por adicionar y métodos utilizados.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 172 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



- Dado el bajo nivel de daño inducido tras 3,2 millones de ejes equivalente, se recomienda plantear una segunda etapa del ensayo, con el propósito de extender el nivel de daño en las pistas con menores tasas de daño, respecto al control. Con el objetivo de poder analizar de mejor forma la tendencia en las tasas de daño inducido.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, J. P., Cruz, L. M., Porras, A., Vargas, A. & Loria, L. G. (2015). Materiales de desecho como modificantes de la mezcla asfáltica. Congreso Iberoamericano del Asfalto. Bariloche, Argentina.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2020). Standard Method of Test for: *Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates* (AASHTO T 27-20). Washington, D.C., 2021.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2020). Standard Method of Test for: *Materials Finer Than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing* (AASHTO T 11-20). Washington, D.C., 2021.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2021). Standard Method of: *Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate* (AASHTO T 85-21). Washington, D.C., 2021.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2013). Standard Method of Test for: *Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate* (AASHTO T 84-13). Washington, D.C., 2021.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1991). Standard Specification for: *Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes* (AASHTO M 145-91). Washington, D.C., 2017.



American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2017).
Standard Specification for: *Materials for Aggregate and Soil–Aggregate Subbase,
Base, and Surface Courses* (AASHTO M 147-17). Washington, D.C., 2017.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2021).
Standard Method of Test for: *Moisture–Density Relations of Soils Using a 4.54-kg
(10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop* (AASHTO T 180-21). Washington, D.C.,
2021.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2022).
Standard Method of Test for: *The California Bearing Ratio* (AASHTO T 193-22).
Washington, D.C., 2022.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2019).
Standard Method of Test for: *Determining the Resilient Modulus of Soils and
Aggregate Materials* (AASHTO T 307-99). Washington, D.C., 2021.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2012). Standard Test Method for:
Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate
(AASHTO C 127-12). West Conshohocken, 2012.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2018). Standard Practice for: *Reducing
Samples of Aggregate to Testing Size* (ASTM C 702-18). West Conshohocken,
2018.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2018). Standard Test Methods for:
Particle Size (Sieve Analysis) of Plastic Materials (ASTM D 1921-18). West
Conshohocken, 2018.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2019). Standard Test Method for: *Sieve
Analysis of Fine and Coarse Aggregates* (ASTM C 136-19). West Conshohocken,
2020.



American Society for Testing and Materials (ASTM) (2020). Standard Test Methods for: *Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement* (ASTM D792). West Conshohocken, 2020.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2020). Standard Test Methods for: *Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement* (ASTM D 792-20). West Conshohocken, 2020.

Aschuri, I., Yamin, A., & Widyasih, Y. D. (2016). The use of waste plastic as a partial substitution aggregate in asphalt concrete pavement. Indonesia.

Baldi, A., Aguiar, J.P. (2020). LM-PI-UIIT-104-R3: Informe de Resultados de las Pruebas Térmicas y Químicas al Plástico Tipo PET. Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Baldi, A., Aguiar, J.P. (2020). LM-PI-UIIT-104-R4: Informe de Resultados de las Pruebas Térmicas y Químicas al Plástico Tipo PEAD. Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Compañía Asesora de Construcción e Ingeniería (CACISA) (2019). Informe de ensayo: *Control de Calidad de la Planta de Mezcla Asfáltica* (INF-0201-2019). San Antonio, Alajuela, Costa Rica: CACISA.

Hassani, A., Ganjidoust, H., & Maghanaki, A. A. (2005). Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. Irán.

Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 50(2), 2-9.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2021). Informe de ensayo: *Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas con materiales de desecho* (INF-0911-2021). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 175 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2021).
Informe de ensayo: *Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con materiales de desecho* (EIC-Lanamme-INF-0364-2021). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2021).
Informe de ensayo: *Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezcla asfáltica modificado con material de desecho* (INF-0559-2021). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2021).
Informe de ensayo: *Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con materiales de desecho* (EIC-Lanamme-INF-0108-2021). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2021).
Informe de ensayo: *UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas con materiales de desecho* (EIC-Lanamme-INF-0364-2021). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2021).
Informe de ensayo: *Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas asfáltica*. (I-0914-2021). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2020).
Informe de ensayo: *Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezcla modificada con material de desecho* (I-0883-2020). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2018).
Parámetros de Análisis Estructural de Pavimentos en Costa Rica (LM-PI-UMP-083-R1). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 176 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2020). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2020). San José: MOPT.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2013). Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *Malasia: Journal of Engineering Science and Technology*.
- NAPA (2018). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2018. Information Series 138 — Executive Summary. National Asphalt Pavement Association. Greenbelt, MD
- Rahman, W. M., Wahab, A. F., & Yahaya, F. (2014). Optimisation of recycled high-density polyethylene pellet as aggregate replacement for road pavement. *Malasia: Journal of Engineering and Technology*.
- Villegas-Villegas, R. E., Loria-Salazar, L. G., Aguiar-Moya, (2018). Diseño de mezcla asfáltica con materiales de desecho. *Revista RIOCI*, vol 8, 1/2018, pag 7-18, Chile.
- Villegas-Villegas, R. E., Loria-Salazar, L. G., Aguiar-Moya, J. P., Fernández-Gomez, W. D., & Reyes-Lizcano, F. A. (2012). Recycling of banana production waste bags in bitumens: A green alternative. *EUROBITUMEN-Estambul*, Memoria congreso.
- Zoorob, S., & Suparna, L. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). Reino Unido: Elsevier Science Ltd



10 ANEXOS

Anexo 1: Esquema de ensayo, sin acondicionamiento

Ejemplo protocolo de ensayos y esquemas de aplicaciones de carga para tramos HVS sin acondicionamiento por temperatura (Tramo 015, 016 y 017).

 <p>Programa Infraestructura en Transporte PITRA</p> <p>Solicitud de Ensayos a Laboratorios LanammeUCR</p> <p style="text-align: right;">Consecutivo UIIT: SD-UIIT-20-2021</p>											
<p>Unidad: Unidad de investigación en infraestructura y transporte</p> <p>Fecha de Solicitud: <u>17/6/2021</u> Laboratorio: <u>Pavimentos a Escala Natural</u> Responsable Laboratorio: <u>Ing. Edgar Camacho</u></p> <p>Nombre Proyecto: <u>UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezcla modificada con material de desecho</u> Aprobado en Acta 9-2019 del Consejo Técnico del LanammeUCR Código VI: <u>LanammeUCR</u></p>											
<p>1 - Muestras Asociadas:</p> <p>Número de Muestra</p> <p>M-2081-19 Tramo HVS 017 - Mezcla 1% PEAD</p>	<p>2 - Ensayos Solicitados:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Ensayo</th> <th>Detalle del ensayo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Perfil Superficial</td> <td>Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)</td> </tr> <tr> <td>Deflectómetro de superficie</td> <td>Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)</td> </tr> <tr> <td>Control de temperatura</td> <td>Cada 30 minutos (Ver detalle en documento adjunto)</td> </tr> <tr> <td>Fotografías</td> <td>Cada 100 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)</td> </tr> </tbody> </table>	Ensayo	Detalle del ensayo	Perfil Superficial	Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)	Deflectómetro de superficie	Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)	Control de temperatura	Cada 30 minutos (Ver detalle en documento adjunto)	Fotografías	Cada 100 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)
Ensayo	Detalle del ensayo										
Perfil Superficial	Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)										
Deflectómetro de superficie	Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)										
Control de temperatura	Cada 30 minutos (Ver detalle en documento adjunto)										
Fotografías	Cada 100 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)										



DETALLE SOLICITUD DE ENSAYOS

Proyecto: UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezcla modificada con material de desecho, aprobado según Acta 9-2019 del Consejo Técnico del LanammeUCR.

Muestras: En la Tabla A1.1 se enumera la muestra por ensayar.

Descripción del trabajo: A continuación, se describen los ensayos que se solicitan a los Laboratorios del Área de Transportes y Pavimentos.

Protocolo de ejecución del ensayo: se solicita que se ejecuten 20 000 repeticiones de carga por día, bidireccional con una desviación lateral de 8 in a 10 km/h, presión de inflado 100 psi, además de lo establecido en la Tabla A1.4. El ensayo deberá detenerse si ocurre alguna de las especificaciones mostradas en la Tabla A1.3.

En la Tabla A1.1 se detalla a manera de resumen los ensayos que se desea realizar a la pista de prueba.

Tabla A1.1. Resumen de ensayos a realizar por pista

# muestra	Tramo	Ensayos por realizar	Frecuencia
M-2081-19	Tramo 017, 1% PEAD	Perfil Superficial	Cada 20 000 repeticiones de carga ²
		Deflectómetro de superficie	Cada 20 000 repeticiones de carga ²
		Control de temperatura	Cada 30 minutos ³
		Fotografías	Cada 100 000 repeticiones de carga ³

²La aplicación y frecuencia del ensayo se detallan en la tabla A1.2

³La aplicación y frecuencia del ensayo se detallan en la tabla A1.5

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 179 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Ensayos de desempeño: Para cada tramo individual efectuar los ensayos que se especifican en la Tabla A1.2.

Tabla A1.2. Ensayos de desempeño por tramo de pavimento individual

Ensayo	Descripción	Periodicidad
Perfil superficial	Perfil de la pista antes de iniciar el ensayo (0 repeticiones), que permita ver la evolución del ahuellamiento y regularidad superficial	Una vez antes de iniciar el ensayo
	Perfil de la pista que permita ver la evolución del ahuellamiento y regularidad superficial en el tramo	Cada 20 000 repeticiones hasta la falla (Tabla 3)
Deflectómetro de superficie (RSD, por sus siglas en inglés)	Se deberá generar un archivo inicial de calibración en cada cambio de carga, en dos extremos de los 5 puntos definidos, con mediciones paralelas a la línea de centro (centro de llanta), a 40 kN y 2 km/h con 3 repeticiones por punto	Cada 20 000 repeticiones
	Mediciones a 40 kN y 2 km/h en los 5 puntos de medición, utilizando la desviación angular en la posición de la viga definida en el primer ensayo a escala natural	Cada 20 000 repeticiones
	Medición a 20 kN y 2 km/h en los 2 puntos extremos de las 5 ubicaciones definidas, con orientación paralela a la línea de centro.	Cada 20 000 repeticiones

Notas:

- Para las primeras 20 000 repeticiones de cargas, se realizarán los ensayos a una mayor frecuencia. A saber, se tomarán mediciones a las 0, 10, 20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000 repeticiones



Tabla A1.3. Especificaciones de falla para detención del ensayo

Ocurrencia	Especificación
1	Ocurre una deformación promedio máxima de 12,5 mm (calculada promediando los valores de mayor deformación de cada perfil transversal obtenido)
2	El módulo de la mezcla asfáltica es igual o menor al 30% del valor del módulo inicial, calculado a partir de los datos asociados al retrocálculo realizado por la UIIT
3	Se cumplen la totalidad de las repeticiones de carga establecidas en la Tabla A1.4

Tabla A1.4. Protocolo de ejecución del ensayo por tramo de pavimento individual

Cantidad de repeticiones	Carga	Ejecución de las repeticiones de carga
400 000	40 kN	Completas
200 000	50 kN	Completas
200 000	60 kN	Revisable según especificaciones de falla (Tabla A1.3)
200 000		

Otras mediciones: Además de lo solicitado anteriormente se deberán realizar los ensayos definidos en la Tabla A1.5.

Tabla A1.5. Otras mediciones para realizar por tramo de pavimento individual

Ensayo	Descripción	Periodicidad
Temperatura	Perfil de temperatura del pavimento (profundidad media) y ambiente	Mediciones continuas cada 30 minutos
Fotografía	Registro fotográfico en planta, conformado por una secuencia de fotografías estándar en alta definición tal que, permita realizar foto “stitching” del tramo	Cada 100 000 repeticiones o a la aparición de nuevos deterioros. Notificar a la UIIT

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 181 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Anexo 2: Esquema de ensayo, con acondicionamiento

Ejemplo protocolo de ensayos y esquemas de aplicaciones de carga para tramos HVS con acondicionamiento por temperatura a 42,5° (máxima) Celsius (Tramo 019, 020 y 021).

Programa Infraestructura en Transporte PITRA	
Solicitud de Ensayos a Laboratorios LanammeUCR	
Consecutivo UIIT: 80-UIIT-08-2022	
Unidad: <u>Unidad de Investigación en Infraestructura y transporte</u>	
Fecha de Solicitud: <u>08/02/2022</u>	Laboratorio: <u>Pavimentos a Escala Natural</u>
Responsable Laboratorio: <u>Ing. Edgar Gamacho</u>	
Nombre Proyecto: <u>UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas modificadas con material de desecho</u>	
Aprobado en Acta 9-2019 del Consejo Técnico del LanammeUCR	
Código VI: <u>LanammeUCR</u>	
1 - Muestras Acondicionadas:	2 - Ensayos Realizados:
Número de Muestra	Ensayo
	Detalle del ensayo
	Perfil Superficial
	Cada 20 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)
	Deflectómetro de superficie
	Una vez al día antes de iniciar el ciclo de calentamiento; al menos una medición cada 20 000 repeticiones de carga y al final de la semana una medición adicional en caliente (Ver detalle en documento adjunto)
	Control de temperatura
	Cada 30 minutos (Ver detalle en documento adjunto)
	Fotografías
	Cada 100 000 repeticiones de carga (Ver detalle en documento adjunto)
M-2086-1B Tramo HVS 021 - Mezcla con 1%PEAD (acondicionado)	Temperatura cámara climática
	Acondicionamiento del tramo con temperatura alta, utilizando la cámara climática del HVS y sus lámparas de radiación infrarroja. Se propone que la temperatura sea sostenida y lo más estable posible durante el ensayo. La temperatura objetivo promedio del pavimento durante el ensayo se determina en 42,5°C, a 50 mm de profundidad, con un rango válido que puede oscilar entre los 41°C como límite inferior y 44°C como límite superior. Para controlar la temperatura máxima de la mezcla y evitar someterla a condiciones extremas que podrían alejarse de condiciones consideradas se recomienda no exceder los 50°C en la superficie de la MAC y mantener la temperatura superficial por encima de los 40°C el mayor tiempo posible. Para esto se recomienda realizar un control semanal similar al utilizado en el HVS-019 (M-2083-19).
	Para lograr los parámetros anteriores, según pruebas realizadas en conjunto con LPEN se recomienda configurar la cámara a 38°C, con un monitoreo y control de temperatura al centro del tramo en la zona más próxima de la huella de la llanta (50 cm del centro del tramo), de la misma forma que fueron realizadas las pruebas en el tramo HVS-019 (M-2083-19).
	Se solicita realizar un registro de la temperatura del aire, temperatura superficial, y a profundidades de 20 mm, 50 mm y 90mm, de ser posible. (En todo caso dar prioridad al esquema del tramo HVS-019 (M-2083-19)
	Para garantizar un registro adecuado de temperatura se recomienda realizar un monitoreo de la temperatura para al menos 2 sitios en el caso de temperatura del aire (distribuidos dentro de la cámara)
	El esquema de carga puede iniciar en conjunto con el encendido diario de la cámara climática



DETALLE SOLICITUD DE ENSAYOS

Proyecto: UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezcla modificada con material de desecho, aprobado según Acta 9-2019 del Consejo Técnico del LanammeUCR

Muestras: En la Tabla A2.1 se enumera la muestra por ensayar.

Descripción del trabajo: A continuación, se describen los ensayos que se solicitan a los Laboratorios del Área de Transportes y Pavimentos.

Protocolo de ejecución del ensayo: se solicita que se ejecuten 20 000 repeticiones de carga por día, bidireccional con una desviación lateral de 8 in a 10 km/h, presión de inflado 100 psi, además de lo establecido en la Tabla A2.4. El ensayo deberá detenerse si ocurre alguna de las especificaciones mostradas en la Tabla A2.3.

En la Tabla A2.1 se detalla a manera de resumen los ensayos que se desea realizar a la pista de prueba.

Tabla A2.1. Resumen de ensayos a realizar por pista

# muestra	Tramo	Ensayos por realizar	Frecuencia
M-2085-19	Tramo 021, 1%PEAD (acondionado)	Perfil Superficial	Cada 20 000 repeticiones de carga ²
		Deflectómetro de superficie	Una vez al día o cada 20 000 repeticiones de carga ²
		Control de temperatura	Cada 30 minutos ³ Los 7 días de la semana
		Fotografías	Cada 100 000 repeticiones de carga ³

²La aplicación y frecuencia del ensayo se detallan en la tabla A2.2

³La aplicación y frecuencia del ensayo se detallan en la tabla A2.5

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 183 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Ensayos de desempeño: Para cada tramo individual efectuar los ensayos que se especifican en la Tabla A2.2.

Tabla A2.2. Ensayos de desempeño por tramo de pavimento individual

Ensayo	Descripción	Periodicidad
Perfil superficial	Perfil de la pista antes de iniciar el ensayo (0 repeticiones), que permita ver la evolución del ahuellamiento y regularidad superficial	Una vez antes de iniciar el ensayo
	Perfil de la pista que permita ver la evolución del ahuellamiento y regularidad superficial en el tramo	Cada 20 000 repeticiones hasta la falla (Tabla A2.3)
Deflectómetro de superficie (RSD, por sus siglas en inglés)	Se definirán 5 puntos de análisis a cada 1m dentro del tramo	Una vez antes de iniciar el ensayo
	Las mediciones deberán realizarse todos los días antes de iniciar con el ciclo de calentamiento de la Cámara. Y los viernes se deberá realizar una medición adicional al final de la jornada (temperatura alta).	
	Se deberá generar un archivo inicial de calibración en cada cambio de carga, en dos extremos de los 5 puntos definidos, con mediciones paralelas a la línea de centro (centro de llanta), a 40 kN y 2 km/h con 3 repeticiones por punto	Una vez al día o aproximadamente cada 20 000 repeticiones
	Mediciones a 40 kN y 2 km/h en los 5 puntos de medición, utilizando la desviación angular en la posición de la viga definida en el primer ensayo a escala natural	Una vez al día o aproximadamente cada 20 000 repeticiones
	Medición a 20 kN y 2 km/h en los 2 puntos extremos de las 5 ubicaciones definidas, con orientación paralela a la línea de centro.	Cada 100 000 repeticiones

Notas:

- ^a Para las primeras 20 000 repeticiones de cargas, se realizarán los ensayos a una mayor



frecuencia. A saber, se tomarán mediciones a las 0, 10, 20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000 repeticiones.

- ^b Para las primeras 20 000 repeticiones de cargas, se realizarán los ensayos a una mayor frecuencia. A saber, se tomarán mediciones a las 0, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000 repeticiones. Reportar de forma adicional las temperaturas (aire, superficial, 2cm, 5 cm, y 9cm, en las repeticiones de 0, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000). Se recomienda apagar las lámparas sólo cuando sea estrictamente necesario.

Tabla A.2.3. Especificaciones de falla para detención del ensayo

Ocurrencia	Especificación
1	Se cumplen la totalidad de las repeticiones de carga establecidas en la Tabla 4.
2	El módulo de la mezcla asfáltica es igual o menor al 30% del valor del módulo inicial, calculado a partir de los datos asociados al retrocálculo realizado por la UIIT, tomando como referencia las mediciones a bajatemperatura.
3	Ocurre una deformación promedio máxima de 16,5 mm (calculada promediando los valores de mayor deformación de cada perfil transversal obtenido). Este valor puede ser revisable semanalmente en caso de que el ahuellamiento sea acelerado y se tenga un numero bajo de repeticiones

Tabla 4. Protocolo de ejecución del ensayo por tramo de pavimento individual

Cantidad de repeticiones	Carga	Ejecución de las repeticiones de carga
400 000	40 kN	Completas
200 000	50 kN	Completas
200 000	60 kN	Revisable según especificaciones defalla (Tabla 3)
200 000		



Otras mediciones: Además de lo solicitado anteriormente se deberán realizar los ensayos definidos en la Tabla 5.

Tabla A.2.4. Otras mediciones para realizar por tramo de pavimento individual

Ensayo	Descripción	Periodicidad
Temperatura	<p>Perfil de temperatura del pavimento en dos ubicaciones y a estas profundidades (aire, superficial, 2cm, 5cm y 9 cm).</p> <p>Adicionalmente, valorar colocar al menos un termopar en la zona central del tramo para temperatura superficial y 5cm.</p> <p>(En todo caso dar prioridad al esquema utilizado en el tramo HVS-019 (M-2083-19))</p>	Mediciones continuas cada 30 minutos
Fotografía	Registro fotográfico en planta, conformado por una secuencia de fotografías estándar en alta definición tal que, permita realizar foto “stitching” del tramo	Cada 100 000 repeticiones o a la aparición de nuevos deterioros. Notificar a la UIIT



Anexo 3: Protocolo recolección de material

El Protocolo para el muestreo de material residual de las pistas de ensayo en laboratorio, fue un trabajo desarrollado dentro de la Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT) a cargo de la Ingeniera Marianela Espinoza Alfaro M. Eng. y la Ing. Raquel Arriola Guzmán M. Sc en el año 2022, como parte del proyecto UNAT-2021-01, proyecto que busca determinar si la cantidad de microplásticos que se pueden generar por desprendimiento de la mezcla asfáltica contribuye a impactos ambientales potenciales negativos.

PROTOCOLO PARA EL MUESTREO DE MATERIAL RESIDUAL DE LAS PISTAS DE ENSAYO EN LABORATORIO

RESUMEN

En el presente documento se establece el protocolo a seguir para la recolección de muestras de microplásticos resultantes del desprendimiento de partículas en las pistas del equipo Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés) en el Laboratorio de Pavimentos a Escala natural (LPEN) del LanammeUCR.

Este protocolo se aplicará en las actividades de muestreo que se realicen en los tramos que confirman cada una de las pistas, dando inicio con el tramo 016, compuesto por la mezcla modificada con Tereftalato de Polipropileno (PET, por sus siglas en inglés).

Lo anterior, forma parte de una cuarta etapa del proyecto denominado: Diseño, Construcción y Evaluación del desempeño de mezcla asfáltica modificado con material de desecho, que corresponde al anteproyecto sobre la evaluación y análisis de posibles desprendimientos de microplásticos

INTRODUCCION

En este documento se describe el procedimiento y equipo para la actividad de recolección de residuos de mezcla asfáltica modificada para la detección de microplásticos como

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 187 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



resultado del desprendimiento en las pistas del Simulador de Vehículos Pesados (HVS) en el Laboratorio de Pavimentos a Escala Natural (LPEN) del LanammeUCR.

Asimismo, se presentan algunas consideraciones a tomar en cuenta como mejora durante las actividades de recolección y posterior análisis.

MATERIAL DE MUESTREO

El material a muestrear corresponde a material residual de mezcla asfáltica modificada con plástico, producto del desprendimiento generado en las pistas de ensayo del HVS para los carriles con mezcla asfáltica modificada con Tereftalato de Polietileno (PET) y Polietileno de Alta Densidad (PEAD). De este material residual el objetivo es determinar la presencia de microplásticos, los cuales se definen como aquellas partículas producto de la degradación de residuos plásticos, cuyo tamaño es menor que 5 mm.

Existen muchos tipos de plástico, cada uno con una composición química muy diferente, por lo que el Consejo Americano de Química (ACC, por sus siglas en inglés), destaca los siguientes según su código de resina polimérica.

- Tereftalato de Polipropileno (PET)
- Polietileno de Alta Densidad (HDPE)
- Cloruro de Polivinilo (PVC)
- Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
- Polipropileno (PP)
- Poliestireno (PS), y otros

Actualmente, en el LPEN se cuenta con tramos que poseen mezcla asfáltica modificada con Tereftalato de Polietileno (PET), Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Arena Sintética (AS), sin embargo, esta última no será contemplada en el análisis de microplásticos.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 188 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



DESCRIPCION DEL SITIO DE MUESTREO

La recolección de muestras se realizará en el Laboratorio de Pavimentos a Escala Natural del LanammeUCR. En este laboratorio se cuenta con 8 tramos de ensayo como se detalla en la Figura A3.1. Sin embargo, el análisis se centrará en los tramos con PET y con PEAD.,

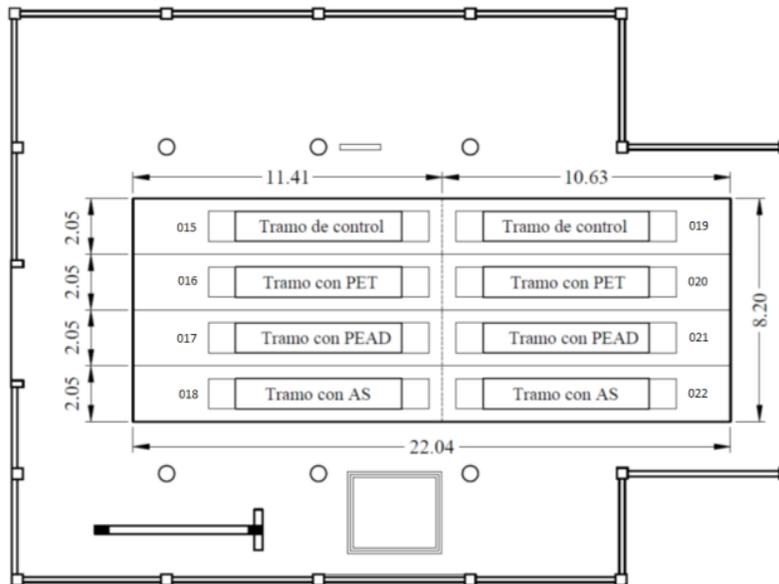


Figura A3.1. Esquema de vista en planta de las pistas y tramos que se conforman para el análisis de pavimento de mezcla asfáltica modificada con material de desecho (los tramos con AS no se contemplan en este estudio). Fuente: LPEN

Para el muestreo se iniciará con el tramo 016, compuesto por mezcla asfáltica modificada con Tereftalato de Polipropileno (PET, por sus siglas en inglés).

ACONDICIONAMIENTO DEL SITIO DE MUESTREO

El sitio de nuestro corresponde al Laboratorio de Pavimentos a Escala Natural del LanammeUCR, para el cual se debe tener presente algunas consideraciones previo a la recolección de las muestras:

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 189 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



- Se debe asegurar siempre que sea posible, que el laboratorio tenga las puertas cerradas durante la recolección, de manera que se evite el ingreso de viento y conlleve a pérdidas significativas de las muestras. Cuando no sea posible cerrar las puertas, se debe procurar realizar la recolección cuando no exista presencia de viento.
- Se deben colocar lonas paralelas a la pista (Figura A3.2) que se esté muestreando, con el fin de minimizar el escape de partículas y proveer una zona más controlada para la recolección del material producto del desprendimiento.

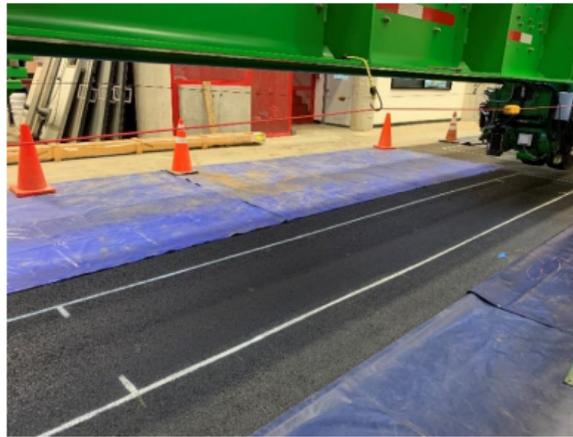


Figura A3.2. Fotografía de lonas colocadas de forma paralela a la pista de ensayo.

Fuente: LPEN

- Se recomienda colocar una barrera de madera, metal o similar al lado contrario de donde se encuentra el enfriador de aceite del HVS (Figura A3.3). Esto porque el dispositivo genera la circulación de aire, y por ende arrastra mayor cantidad de partículas al final de la pista, de manera que al colocar una barrera se minimiza el escape de partículas por acción del aire.

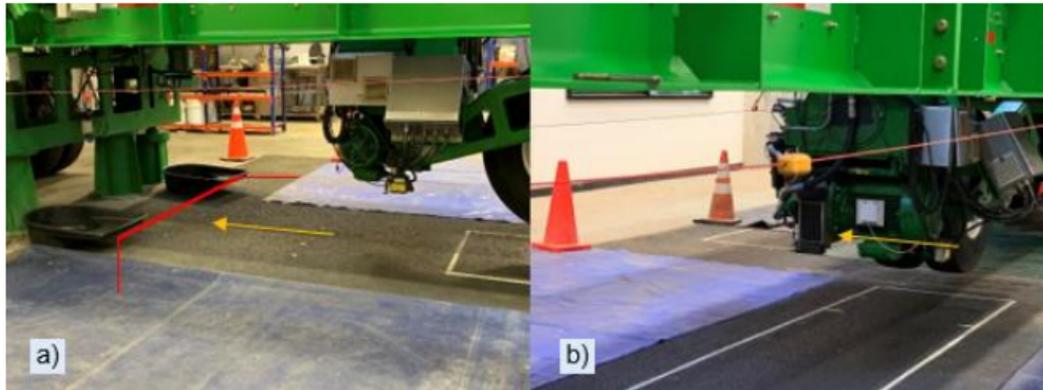


Figura A3.3. a) Fotografía de la zona en donde se debe colocar la barrera, b) Fotografía de enfriador de aceite del equipo HVS.

Fuente: LPEN

- Es importante, limitar por medio de señalización (conos, bandas retroreflectivas u otros) el ingreso de personas o algún equipo dentro de la pista previo a la recolección, para evitar la manipulación no correcta de las muestras.

HERRAMIENTA PARA RECOLECCION DE MUESTRAS

En cuanto al material residual, el equipo de recolección puede ser variado, desde equipo complejo hasta muy sencillo. Sin embargo, un muestro idóneo, más allá del equipo, depende de los cuidados que se consideren durante la recolección de las muestras. A continuación, se presenta el equipo pro utilizar:

Escoba: se recomienda que sea con cerdas antiestáticas para favorecer el movimiento de polvo y partículas muy finas. Sin embargo, se puede utilizar escoba de uso común, siempre teniendo en cuenta que se encuentre limpia y con las cerdas no desgastadas.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 191 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Pala: se recomienda que sea metálica para evitar el contacto de plástico. No obstante, se puede utilizar una pala de plástico que se encuentre limpia y libre de residuos (sólidos o líquidos).



Figura A3.4. Fotografía de escoba y pala para recolección de muestras.

Fuente: LPEN

Envase para muestras: se recomienda que los recipientes a utilizar para recolectar las muestras de material residual sean de vidrio o metal, esto para evitar contaminar las muestras con otro tipo de plástico.

Etiqueta envase para muestra: para la etiqueta del recipiente, se debe indicar con marcador visible los datos referentes a fecha en que se recolectó la muestra y el número de pasadas del equipo HVS al momento de la toma de muestra.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 192 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

Para la recolección de muestras en el laboratorio se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 1.- Identificar de forma previa el tramo y la pista dentro del laboratorio, en los que se realizará la recolección de muestras para su posterior análisis, De manera que, se ingrese directo al tramo y se realicen las actividades necesarias.
- 2.- Informar al jefe del Laboratorio a Escala natural o al técnico asistente, sobre el ingreso al sitio. Es importante considerar que el equipo del HVS trabaja con ventanas de operación, por lo que se recomienda la recolección de muestras cuando el equipo se detiene.
- 3.- Ingresar al laboratorio con dispositivos de seguridad.
- 4.- Verificar que el equipo de recolección (escoba y pala) se encuentren limpios, secos y libres de residuos.
- 5.- Colocar las lonas paralelas a la pista que se va a muestrear y la barrera contra escape de partículas.
- 6.- Iniciar la recolección de las muestras con el uso de la pala y escoba, realizando el movimiento de los bordes de la pista hacia adentro de esta. De manera que, se evite el escape lateral de las muestras.
- 7.- Realizar el barrido de toda la pista, iniciando desde el extremo donde se encuentra la zona de la barrera (antes del tramo de estudio demarcado), debido a que en ese sitio se ha encontrado la mayor cantidad de partículas desplazadas pro el flujo de aire que genera el enfriador del HVS. El barrido y recolección con la pala se realizará de forma ordenada, con acción simultanea barrido-recolección (no acumular el material en un punto), en subtramos consecutivos de hasta 1x1 metro, para asegurar la recolección en áreas dentro de un campo visual delimitado, hasta concluir en el extremo opuesto de la pista (ver Figura A3.5).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 193 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Figura A3.5. Secuencia de barrido de la pista para la recolección del material residual.

Fuente: LPEN

8.- Trasladar las muestras de la pala al recipiente de recolección, para lo cual se debe realizar de forma lenta y lo más cercano posible al recipiente para evitar pérdidas de material de la muestra.

9.- Colocar la etiqueta en cada recipiente, con fecha y número de pasadas del equipo HVS.

10.- Colocar las muestras en un lugar seco, a temperatura ambiente, para su posterior envío al Laboratorio de Materiales para Pavimentos (LMP), en donde se realizará el pesado de asignación de un número de ingreso para cada muestra, para su posterior análisis.

FRECUENCIA DE MUESTREO

La frecuencia del muestreo puede ser variable por lo mencionado anteriormente con respecto a las ventanas de operación del equipo HVS. Sin embargo, se puede considerar una frecuencia de recolección cada 10.000 a 20.000 repeticiones.



En este aspecto, se debe tener presente que las muestras más significativas suelen presentarse en los primeros días que inicia el ensayo de repeticiones de carga en el HVS. Por lo que, en las tres primeras semanas, se recomienda aplicar una frecuencia de 1 vez por día (martes a viernes), en horas de la mañana previendo la detención del equipo. Lo anterior, hasta tanto sea posible establecer una tendencia para la frecuencia a aplicar, con los datos obtenidos de número de pasadas y peso de las muestras, la cual se estará analizando por primera vez con la información del tramo 016.

Luego de estas tres primeras semanas, se puede dar una frecuencia de dos o tres veces por semana, siempre verificando a nivel visual que no haya un cambio significativo de desprendimientos de la mezcla asfáltica.

CONSIDERACIONES FINALES

El muestreo de este tipo de material residual es reciente en el laboratorio, y se realizará para cada tramo de las pistas por lo que cualquier condición de mejora en el procedimiento se registrará, con el fin de obtener muestras adecuadas para posteriores análisis de composición y caracterización.

Este documento presenta únicamente el procedimiento para la recolección de las muestras, no obstante, luego se presentará una segunda parte relacionada con el procedimiento para el análisis y ensayos correspondientes de las muestras de material residual recolectadas.



Anexo 4: Diseño MAC original

Diseño de Mezcla asfáltica TMN 12,7mm

Agregado del Quebrador Piedra Grande

Planta PAVICEN – INF. 348-2018 (febrero 2018)

El diseño presentado fue elaborado por el Laboratorio de la Compañía Asesora en Construcción e Ingeniería, denominada CACISA.

Los agregados se han mezclado en una proporción de 38% de material grueso, y un 62% de material fino.

Tabla A4.1. Granulometría de gruesos (Piedra quinta) AASHTO T 27/11.

Tamiz	% Pasando
19.0 mm	100
12.7 mm	88
9.5 mm	56
N. 4	7
N. 8	2
N. 16	1
N. 30	1
N. 50	1
N. 200	1,0

Tabla A4.2. Granulometría de finos (Polvo de piedra) AASHTO T 27/11.

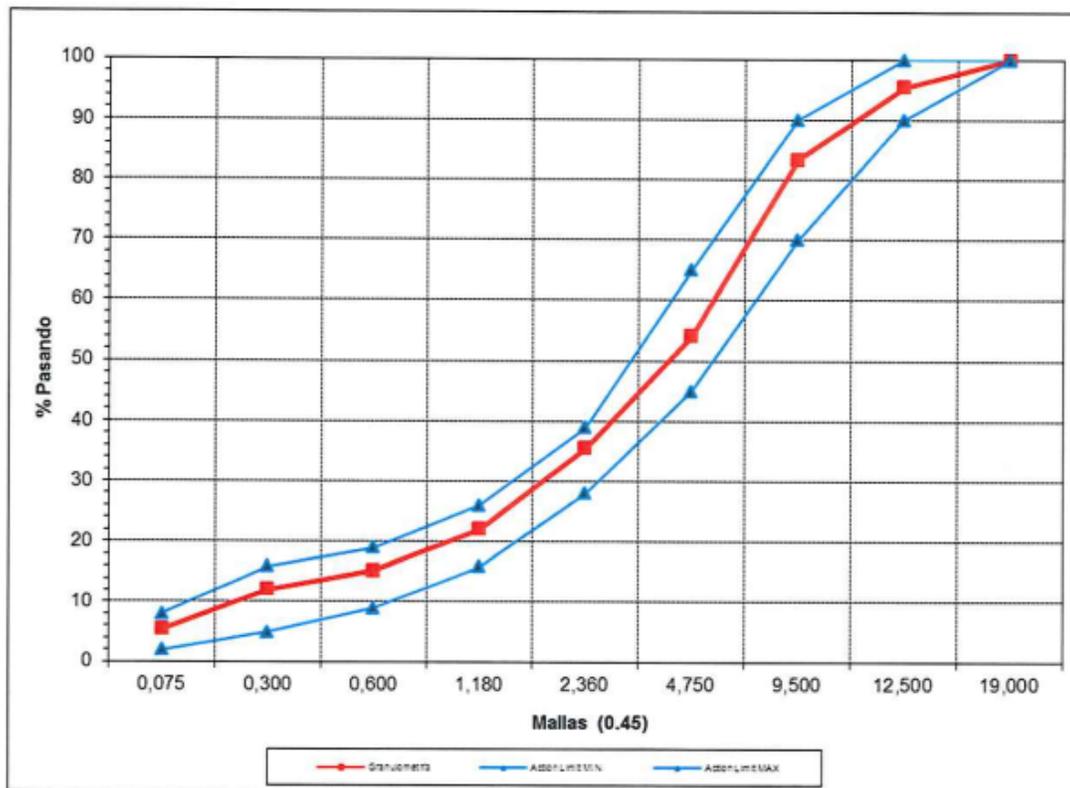
Tamiz	% Pasando
9.5 mm	100
N. 4	83
N. 8	56
N. 16	35
N. 30	24
N. 50	19
N. 200	8,2



Granulometría de diseño:

Tabla A4.3. *Granulometría de diseño.*

Tamiz	% Pasando	Tolerancias y Especificaciones para Tamaño Máx. Nominal 12,7 mm	Rangos para la Fórmula de Trabajo
19.0 mm	100	100	100
12.7 mm	95	90-100 (± 5)	90-100
9.50 mm	83	70-90 (± 5)	78-88
Nº 4	54	45-65 (± 4)	50-58
Nº 8	35	28-39 (± 4)	31-39
Nº 16	22	16-26 (± 4)	18-26
Nº 30	15	9-19 (± 4)	11-19
Nº 50	12	5-16 (± 4)	8-16
Nº 200	5,5	2-8 (± 2)	3,5-7,5





Gravedad específica y absorción de los agregados de diseño

Agregado grueso:

Gravedad específica bruta, AASHTO T 85: 2,622

% de absorción, AASHTO T 85: 2,2

Agregado fino

Gravedad específica bruta, AASHTO T 84: 2,559

% de absorción, AASHTO T 84: 3,4

Gravedad específica y absorción ponderadas

Gravedad específica bruta: 2,583

% de absorción: 2,9

Resumen de las pruebas del agregado

Tabla A4.4. Granulometría de diseño.

AGREGADO GRUESO	RESULTADO	Especificación
Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)**	20.3 %	40 % máximo
Pérdida por sanidad con sulfato de sodio (AASHTO T 104)*	2 %	15 % máximo
Índice de durabilidad (AASHTO T 210)**	88,0 %	35 % mínimo
Partículas Planas o Alargadas (ASTM C 119)*	0 %	10 % máximo
Partículas Friables (AASHTO T 112)**	0,2 %	Menor o igual a 2%
Residuo insoluble (ASTM D 3042)**	95,4 %	Mayor o igual a 25 %
Una o más caras fracturadas (ASTM D 5821)*	100 %	95 % mínimo
Dos o más caras fracturadas (ASTM D 5821)*	100 %	90 % mínimo
AGREGADO FINO		
Pérdida por abrasión (AASHTO T 96)**	26.8%	40 % máximo
Pérdida por sanidad (AASHTO T 104)*	4 %	15% máximo
Índice de durabilidad (AASHTO T 210)**	80,0 %	35% mínimo
Equivalente de arena (AASHTO T 176)*	70%	50 % mínimo
Límites de Atterberg (AASHTO T 89/90)*	NP	NP



Propiedades de la Mezcla asfáltica

En el anexo de este documento se encuentran, tal como se solicita, los datos correspondientes a:

- Densidad
- Estabilidad
- Flujo
- V.M.A.
- V.F.A.
- Porcentaje de vacíos en la mezcla
- Gráficas de mejor ajuste para cada parámetro Marshall

Parámetros Marshall para el Porcentaje óptimo de diseño

De acuerdo con el Método de Diseño Marshall y analizando los diferentes parámetros y sus rangos de aceptación, se ha encontrado que la mezcla debe diseñarse a 4.0% de vacíos, para lo que se recomienda un 6,10 % de asfalto sobre el peso de la mezcla (6,5 % sobre el peso de los agregados). Para este porcentaje óptimo de asfalto la mezcla presenta los siguientes parámetros.

PARÁMETROS MARSHALL	VALORES	ESPECIFICACIÓN
Estabilidad (kg)	1768	800 mínimo
Flujo (1/100 cm)	33	20 - 35
Densidad	2,349	-
Máxima Teórica	2,450	-
% vacíos	4,0	3,0 % - 5,0 %
% VMA	15	14,0 mínimo
% VFA	71	65 -78
Relación Polvo / Asfalto	1,2	0,6 - 1,3

Resistencia al Daño Inducido por la Humedad en Mezclas Asfálticas Compactadas (Tensión Diametral) AASHTO T 283.

Para realizar el ensayo de Resistencia a la Tensión Diametral, se procedió a moldear las probetas según la granulometría propuesta, con los agregados sin pasa por el quemador y mezcla fabricada en laboratorio con 5,6 % de asfalto sobre el peso de la mezcla (0.5 % de asfalto menos del porcentaje optimo indicado en el Apartado anterior).

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 199 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



La razón de Tensión Diametral dio como resultado 81,9 %. Este resultado cumple con lo especificado (mayor a 75%).

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla A4.5. Tensión diametral, AASHTO T 283.

N° Pastilla	W seco	W sumerg	W sat.	Gsb	Vol	% Vacíos
1	1135,0	647,5	1142,1	2,295	494,6	7,1
2	1134,8	647,6	1141,6	2,297	494,0	7,0
3	1134,8	646,0	1140,7	2,294	494,7	7,2
4	1132,1	646,3	1139,6	2,295	493,3	7,1
5	1137,1	649,5	1145,0	2,295	495,5	7,1
6	1133,8	647,1	1140,9	2,296	493,8	7,1
7	1135,7	647,9	1142,5	2,296	494,6	7,1
8	1133,8	647,1	1141,3	2,294	494,2	7,2

SATURACIÓN DE LAS PASTILLAS

N° Pastilla	W seco	W sat.	V agua abs	V vacíos	% Sat
1	1135,0	1160,5	25,5	35,3	72,3
2	1134,8	1159,8	25,0	34,8	71,9
3	1134,8	1160,9	26,1	35,5	73,6
4	1132,1	1157,7	25,6	35,1	72,8

N° Pastillas Saturadas	Volumen	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión Diametral (kg/cm ²)	Tensión Diametral (kPa)
1	494,6	6,42	10,17	1441	14,05	1379
2	494,0	6,40	10,17	1440	14,08	1382
3	494,7	6,43	10,17	1437	13,99	1373
4	493,3	6,41	10,17	1464	14,30	1403
Promedio					14,11	1384
Desviación Estandar (kpa)						13,1

N° Pastillas Secas	Volumen	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Carga (kg)	Tensión Diametral (kg/cm ²)	Tensión Diametral (kPa)
5	495,5	6,42	10,17	1770	17,26	1694
6	493,8	6,43	10,17	1764	17,17	1686
7	494,6	6,39	10,14	1738	17,08	1676
8	494,2	6,40	10,17	1781	17,42	1710
Promedio					17,23	1691
Desviación Estandar (kpa)						14,3

Razón de Tensión Diametral	81,9%
----------------------------	-------



**Resistencia a la Compresión de Mezclas Bituminosas (Resistencia Retenida)
AASHTO T 165, T 167.**

Para realizar la prueba de Resistencia a la Compresión, se procedió a moldear las probetas según la granulometría propuesta, con los agregados muestreados y mezcla fabricada en laboratorio con 5.6% de asfalto sobre el peso de la mezcla (0.5% de asfalto menos del porcentaje óptimo indicado en el Apartado de Parámetros Marshall)

La razón de la resistencia Retenida dio como resultado 78.8%. Este resultado cumple con lo especificado (mayor a 75%).

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla A4.6. Resistencia retenida, AASHTO T 165 y T 167.

Pastilla	W seco	W sat.	W sum.	Gsb	% Abs	Vol	% Vacíos
1	1828,9	1837,2	1035,8	2,282	0,454	801,4	7,6
2	1831,2	1839,6	1038,2	2,285	0,459	801,4	7,5
3	1830,6	1838,5	1038,1	2,287	0,432	800,4	7,4
4	1832,4	1839,7	1037,4	2,284	0,398	802,3	7,6
5	1832,8	1840,1	1038,4	2,286	0,398	801,7	7,5
6	1829,6	1837,8	1036,4	2,283	0,448	801,4	7,6
7	1828,5	1837,5	1036,2	2,282	0,492	801,3	7,7
8	1833,7	1842,0	1038,5	2,282	0,453	803,5	7,8

Pastillas Saturadas	Carga (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
1	2074	10,2	10,17	81,2	25,54	365	2506
2	2059	10,2	10,17	81,2	25,36	362	2488
3	2063	10,2	10,17	81,2	25,41	363	2493
4	2068	10,2	10,17	81,2	25,47	364	2499
Promedio:					25,45	363	2496
Desviación Estándar:					0,08	1,1	8

Pastillas Secas	Carga (Kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm ²)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (psi)	Esfuerzo (kPa)
5	2617	10,2	10,17	81,2	32,23	460	3162
6	2612	10,2	10,17	81,2	32,17	459	3156
7	2612	10,2	10,17	81,2	32,17	459	3156
8	2648	10,2	10,17	81,2	32,61	468	3199
Promedio:					32,30	461	3168
Desviación Estándar:					0,21	3,0	21

RAZÓN DE LA RESISTENCIA RETENIDA:	78,8
--	-------------



Anexo 5: Material de Base

Tablas de resultados de ensayo de Módulo resiliente para material de base granular.

Tabla A5.1. MR 1 para el material de base M-1654-19

Secuencia	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo axial cíclico (kPa)	Módulo resiliente (kPa)	Invariante de esfuerzos
0	103,4	93,2	164012	403,4
1	20,7	18,9	84559	81,0
2	20,7	37,7	89184	99,8
3	20,7	56,3	93806	118,4
4	34,5	31,4	93969	134,9
5	34,5	62,3	108278	165,8
6	34,5	93,5	117644	197,0
7	68,9	62,0	128712	268,7
8	68,9	124,4	157542	331,1
9	68,9	186,5	170794	393,2
10	103,4	62,0	142352	372,2
11	103,4	93,2	158912	403,4
12	103,4	186,2	199169	496,4
13	137,9	93,2	178509	506,9
14	137,9	124,4	196290	538,1
15	137,9	248,5	244692	662,2



Tabla A5.2. MR 2 para el material de base M-1654-19

Secuencia	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo axial cíclico (kPa)	Módulo resiliente (kPa)	Invariante de esfuerzos
0	103,4	93,2	179625	403,4
1	20,7	18,7	79030	80,8
2	20,7	37,7	83847	99,7
3	20,7	56,3	89678	118,4
4	34,5	31,3	95428	134,8
5	34,5	62,2	106078	165,8
6	34,5	93,3	114420	196,8
7	68,9	62,3	137979	269,0
8	68,9	124,4	155844	331,1
9	68,9	186,4	165816	393,1
10	103,4	62,2	166330	372,4
11	103,4	93,3	172430	403,5
12	103,4	186,4	196291	496,6
13	137,9	93,3	202821	507,0
14	137,9	124,3	211718	538,0
15	137,9	248,2	240566	661,9



Anexo 6: Retrocálculo de módulos

Tablas de resultados de retrocálculo de módulos posterior a ensayo de deflectometría de impacto FWD.

Tabla A6.1. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 15

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA		3220	3 402									
	GB	30	122	75	2	10	122	72	2	10	122	72	2
	GSB		85	40			85	43			85	43	
	SG		39	43			39	42			39	42	
HMA			3220	2 928									
0+001,0	GB	30	122	123	3	10	122	104	2	10	122	104	2
	GSB		85	48			85	46			85	46	
	SG		39	35			39	47			39	47	
	HMA			3220			2 813						
0+002,0	GB	30	122	132	2	10	122	138	2	10	122	138	2
	GSB		85	54			85	42			85	42	
	SG		39	35			39	51			39	51	
	HMA			3220			2 691						

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 204 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+003,0	HMA		3220	4 143			3220	4 111			3220	4 111	
	GB	30	122	98	3	10	122	101	2	10	122	101	2
	GSB		85	49			85	48			85	48	
	SG		39	41			39	42			39	42	
0+004,0	HMA		3220	3 404			3220	3 168			3220	3 168	
	GB	30	122	90	3	10	122	104	3	10	122	104	3
	GSB		85	70			85	63			85	63	
	SG		39	40			39	41			39	41	
0+005,0	HMA		3220	3 349			3220	3 046			3220	3 046	
	GB	30	122	67	4	10	122	91	5	10	122	91	5
	GSB		85	91			85	76			85	76	
	SG		39	39			39	32			39	32	
0+006,0	HMA		3220	2 960			3220	3 166			3220	3 166	
	GB	30	122	111	4	10	122	95	3	10	122	95	3
	GSB		85	59			85	62			85	62	
	SG		39	38			39	49			39	49	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+007,0	HMA		3220	2 795			3220	3 179			3220	3 179	
	GB	30	122	113	5	10	122	87	3	10	122	87	3
	GSB		85	66			85	74			85	74	
	SG		39	37			39	47			39	47	
0+008,0	HMA		3220	3 148			3220	3 432			3220	3 432	
	GB	30	122	131	3	10	122	114	2	10	122	114	2
	GSB		85	64			85	61			85	61	
	SG		39	33			39	44			39	44	
Promedio	HMA		3220	3 193			3220	3 249			-	-	
	GB	30	122	102	3	10	122	99	3	-	-	-	-
	GSB		85	59			85	56			-	-	
	SG		39	38			39	44			-	-	



Tabla A6.2. Detalle de retrocálculo de módulo final para el tramo 15

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA		2500	2 077			2500	1 971			2000	1 957			2000	1 957	
	GB	30	90	70	2	10	90	77	2	10	100	77	2	10	100	77	2
	GSB		60	48			60	37			60	37			60	37	
	SG		36	29			36	42			43	42			43	42	
0+001,0	HMA		2500	1 127			2500	1 108			2000	1 166			2000	1 166	
	GB	30	90	96	2	10	90	95	2	10	100	90	2	10	100	90	2
	GSB		60	40			60	33			60	35			60	35	
	SG		36	30			36	44			43	43			43	43	
0+002,0	HMA		2500	1 075			2500	1 369			2000	1 351			2000	1 351	
	GB	30	90	178	2	10	90	134	1	10	100	137	1	10	100	137	1
	GSB		60	25			60	25			60	25			60	25	
	SG		36	36			36	48			43	49			43	49	
0+003,0	HMA		2500	1 750			2500	1 676			2000	1 700			2000	1 700	
	GB	30	90	96	2	10	90	104	2	10	100	102	2	10	100	102	2
	GSB		60	45			60	34			60	34			60	34	
	SG		36	35			36	52			43	52			43	52	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA		2500	2 104			2500	1 884			2000	1 767			2000	1 767	
	GB	30	90	78	2	10	90	93	2	10	100	100	2	10	100	100	2
	GSB		60	51			60	44			60	34			60	34	
	SG		36	35			36	36			43	53			43	53	
0+005,0	HMA		2500	1 719			2500	1 861			2000	1 737			2000	1 737	
	GB	30	90	74	4	10	90	63	3	10	100	71	3	10	100	71	3
	GSB		60	48			60	48			60	43			60	43	
	SG		36	35			36	46			43	48			43	48	
0+006,0	HMA		2500	942			2500	1 078			2000	1 043			2000	1 043	
	GB	30	90	158	3	10	90	138	1	10	100	141	1	10	100	141	1
	GSB		60	35			60	32			60	32			60	32	
	SG		36	37			36	50			43	50			43	50	
0+007,0	HMA		2500	1 929			2500	1 876			2000	1 788			2000	1 788	
	GB	30	90	92	1	10	90	96	1	10	100	102	1	10	100	102	1
	GSB		60	64			60	61			60	50			60	50	
	SG		36	31			36	31			43	44			43	44	
Promedio	HMA	30	2500	1 523	2	10	2500	1 563	2	10	2000	1 530	2	-	-	-	-



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB		90	100		90	97			100	100			-	-		
	GSB		60	43		60	38			60	36			-	-		
	SG		36	33		36	43			43	47			-	-		



Tabla A6.3. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 16

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4				Iteración 5			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA		3100	2 387		3100	2 492		2800	2 469		2500	2 303		2500	2 303					
	GB	30	120	86	4	10	120	79	4	10	100	77	3	10	90	91	4	10	90	91	4
	GSB		98	82			98	75			80	78			80	66			80	66	
	SG		39	31			39	42			42	42			45	43			45	43	
0+001,0	HMA		3100	2 734		3100	2 886		2800	2 926		2500	2 750		2500	2 750					
	GB	30	120	93	4	10	120	87	3	10	100	80	3	10	90	91	3	10	90	91	3
	GSB		98	76			98	68			80	74			80	67			80	67	
	SG		39	31			39	42			42	42			45	43			45	43	
0+002,0	HMA		3100	2 609		3100	2 486		2800	2 557		2500	2 413		2500	2 413					
	GB	30	120	61	5	10	120	67	4	10	100	64	4	10	90	74	4	10	90	74	4
	GSB		98	85			98	68			80	69			80	60			80	60	
	SG		39	34			39	47			42	47			45	48			45	48	
0+003,0	HMA		3100	2 280		3100	2 108		2800	2 041		2500	2 199		2500	2 199					
	GB	30	120	57	6	10	120	66	5	10	100	73	6	10	90	60	5	10	90	60	5
	GSB		98	95			98	73			80	65			80	81			80	81	
	SG		39	35			39	49			42	50			45	48			45	48	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			Iteración 5				
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA		3100	1 775		3100	1 831		2800	1 881		2500	1 868		2500	1 868					
	GB	30	120	96	6	10	120	91	5	10	100	85	5	10	90	89	5	10	90	89	5
	GSB		98	85			98	79			80	98			80	79			80	79	
	SG		39	37			39	49			42	35			45	50			45	50	
0+005,0	HMA		3100	2 170		3100	2 349		2800	2 155		2500	2 121		2500	2 121			2500	2 121	
	GB	30	120	84	7	10	120	67	4	10	100	81	6	10	90	84	6	10	90	84	6
	GSB		98	89			98	101			80	92			80	79			80	79	
	SG		39	38			39	49			42	43			45	52			45	52	
0+006,0	HMA		3100	1 983		3100	2 109		2800	2 041		2500	2 025		2500	2 025			2500	2 025	
	GB	30	120	97	7	10	120	83	5	10	100	90	6	10	90	89	5	10	90	89	5
	GSB		98	98			98	101			80	106			80	96			80	96	
	SG		39	38			39	50			42	37			45	50			45	50	
0+007,0	HMA		3100	2 488		3100	2 314		2800	2 380		2500	2 363		2500	2 363			2500	2 363	
	GB	30	120	65	5	10	120	85	5	10	100	77	5	10	90	85	5	10	90	85	5
	GSB		98	162			98	111			80	133			80	102			80	102	
	SG		39	35			39	43			42	37			45	50			45	50	
0+008,0	HMA	30	3100	2 547	5	10	3100	2 675	4	10	2800	2 383	5	10	2500	2 475	4	10	2500	2 475	4



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4				Iteración 5			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB		120	75			120	62			100	86			90	77			90	77	
	GSB		98	117			98	126			80	90			80	102			80	102	
	SG		39	33			39	44			42	46			45	45			45	45	
	HMA		3100	2 311			3100	2 342			2800	2 295			2500	2 266			-	-	
Promedio	GB		120	78			120	76			100	79			90	82			-	-	
	GSB	30		98	96	5	10			98	87	4	10		80	80	5	-		-	-
	SG		39	35			39	46			42	42			45	48			-	-	



Tabla A6.4. Detalle de retrocálculo de módulo final para el tramo 16

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4				Iteración 5			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	30	3000	3 433	4	10	2300	3 417	4	10	2000	3 221	4	10	1800	3 265	4	10	1800	3 265	4
	GB	30	100	39		10	80	38		10	90	47		10	90	47		10	90	47	
	GSB	30	80	49		10	60	61		10	60	42		10	60	41		10	60	41	
	SG	30	40	39		10	30	28		10	31	40		10	35	41		10	35	41	
0+001,0	HMA	30	3000	2 054	4	10	2300	1 872	5	10	2000	1 786	6	10	1800	1 790	6	10	1800	1 790	6
	GB	30	100	31		10	80	41		10	90	47		10	90	47		10	90	47	
	GSB	30	80	53		10	60	39		10	60	34		10	60	35		10	60	35	
	SG	30	40	39		10	30	41		10	31	43		10	35	43		10	35	43	
0+002,0	HMA	30	3000	1 564	5	10	2300	1 684	4	10	2000	1 608	5	10	1800	1 602	5	10	1800	1 602	5
	GB	30	100	46		10	80	39		10	90	43		10	90	44		10	90	44	
	GSB	30	80	33		10	60	39		10	60	35		10	60	34		10	60	34	
	SG	30	40	46		10	30	43		10	31	44		10	35	46		10	35	46	
0+003,0	HMA	30	3000	1 839	4	10	2300	1 528	7	10	2000	1 604	7	10	1800	1 588	5	10	1800	1 588	5
	GB	30	100	36		10	80	58		10	90	55		10	90	53		10	90	53	
	GSB	30	80	82		10	60	65		10	60	65		10	60	52		10	60	52	
	SG	30	40	44		10	30	26		10	31	28		10	35	47		10	35	47	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4				Iteración 5			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	30	3000	2 362	5	10	2300	2 152	6	10	2000	2 192	6	10	1800	2 185	6	10	1800	2 185	6
	GB	30	100	25		10	80	41		10	90	39		10	90	40		10	90	40	
	GSB	30	80	89		10	60	58		10	60	63		10	60	49		10	60	49	
	SG	30	40	47		10	30	34		10	31	31		10	35	49		10	35	49	
0+005,0	HMA	30	3000	1 946	5	10	2300	1 918	6	10	2000	1 850	6	10	1800	1 946	6	10	1800	1 946	6
	GB	30	100	43		10	80	45		10	90	49		10	90	43		10	90	43	
	GSB	30	80	50		10	60	64		10	60	53		10	60	67		10	60	67	
	SG	30	40	53		10	30	29		10	31	38		10	35	29		10	35	29	
0+006,0	HMA	30	3000	1 798	6	10	2300	1 509	8	10	2000	1 462	8	10	1800	1 494	7	10	1800	1 494	7
	GB	30	100	50		10	80	71		10	90	77		10	90	73		10	90	73	
	GSB	30	80	87		10	60	65		10	60	60		10	60	61		10	60	61	
	SG	30	40	34		10	30	32		10	31	33		10	35	36		10	35	36	
0+007,0	HMA	30	3000	1 785	5	10	2300	1 660	5	10	2000	1 676	4	10	1800	1 702	5	10	1800	1 702	5
	GB	30	100	124		10	80	129		10	90	126		10	90	127		10	90	127	
	GSB	30	80	86		10	60	88		10	60	92		10	60	87		10	60	87	
	SG	30	40	37		10	30	36		10	31	35		10	35	36		10	35	36	
Promedio	HMA	30	3000	2 039	5	10	2300	1 900	6	10	2000	1 867	6	10	1800	1 887	6	-	-	-	-



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4				Iteración 5			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	30	100	44		10	80	53		10	90	56		10	90	55		-	-	-	
	GSB	30	80	63		10	60	58		10	60	53		10	60	51		-	-	-	
	SG	30	40	42		10	30	33		10	31	36		10	35	40		-	-	-	



Tabla A6.5. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 17 (iteraciones 1, 2 y 3)

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	30	3200	2 694	4	10	3000	2 892	3	10	2600	2 932	3
	GB	30	130	104		10	110	96		10	120	95	
	GSB	30	120	97		10	80	85		10	80	86	
	SG	30	40	34		10	43	46		10	45	46	
0+001,0	HMA	30	3200	3 021	4	10	3000	3 218	4	10	2600	3 114	4
	GB	30	130	106		10	110	91		10	120	99	
	GSB	30	120	78		10	80	81		10	80	76	
	SG	30	40	39		10	43	46		10	45	47	
0+002,0	HMA	30	3200	3 130	5	10	3000	3 006	5	10	2600	3 010	5
	GB	30	130	71		10	110	83		10	120	81	
	GSB	30	120	94		10	80	79		10	80	70	
	SG	30	40	36		10	43	39		10	45	51	
0+003,0	HMA	30	3200	2 795	6	10	3000	2 571	6	10	2600	2 488	6
	GB	30	130	68		10	110	83		10	120	91	
	GSB	30	120	119		10	80	102		10	80	84	
	SG	30	40	36		10	43	36		10	45	45	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	30	3200	1 994	6	10	3000	1 953	5	10	2600	1 895	6
	GB	30	130	90		10	110	97		10	120	107	
	GSB	30	120	116		10	80	91		10	80	78	
	SG	30	40	37		10	43	52		10	45	54	
0+005,0	HMA	30	3200	2 156	5	10	3000	2 124	5	10	2600	2 065	6
	GB	30	130	87		10	110	94		10	120	98	
	GSB	30	120	126		10	80	103		10	80	111	
	SG	30	40	37		10	43	47		10	45	39	
0+006,0	HMA	30	3200	2 451	4	10	3000	2 135	5	10	2600	2 076	5
	GB	30	130	62		10	110	92		10	120	98	
	GSB	30	120	158		10	80	93		10	80	93	
	SG	30	40	35		10	43	47		10	45	42	
0+007,0	HMA	30	3200	2 252	6	10	3000	2 146	5	10	2600	2 264	5
	GB	30	130	79		10	110	89		10	120	79	
	GSB	30	120	125		10	80	100		10	80	118	
	SG	30	40	35		10	43	46		10	45	40	
0+008,0	HMA	30	3200	2 637	4	10	3000	2 239	5	10	2600	2 351	4



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	30	130	70		10	110	106		10	120	94	
	GSB	30	120	152		10	80	85		10	80	97	
	SG	30	40	31		10	43	46		10	45	45	
Global	HMA	30	3200	2 543	5	10	3000	2 440	5	10	2600	2 430	5
	GB	30	130	81		10	110	92		10	120	93	
	GSB	30	120	116		10	80	91		10	80	89	
	SG	30	40	35		10	43	45		10	45	45	



Tabla A6.6. *Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 17 (iteraciones 4, 5 y 6)*

Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	10	2500	2 987	3	10	2500	2 631	4	10	2500	2 631	4
	GB	10	110	90		10	120	111		10	120	111	
	GSB	10	80	88		10	70	77		10	70	77	
	SG	10	47	46		10	50	47		10	50	47	
0+001,0	HMA	10	2500	3 161	3	10	2500	2 750	4	10	2500	2 750	4
	GB	10	110	94		10	120	120		10	120	120	
	GSB	10	80	80		10	70	66		10	70	66	
	SG	10	47	47		10	50	48		10	50	48	
0+002,0	HMA	10	2500	3 097	5	10	2500	2 859	5	10	2500	2 859	5
	GB	10	110	74		10	120	88		10	120	88	
	GSB	10	80	77		10	70	66		10	70	66	
	SG	10	47	50		10	50	52		10	50	52	
0+003,0	HMA	10	2500	2 506	6	10	2500	2 475	5	10	2500	2 475	5
	GB	10	110	89		10	120	87		10	120	87	
	GSB	10	80	80		10	70	85		10	70	85	
	SG	10	47	51		10	50	50		10	50	50	



Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	10	2500	2 025	6	10	2500	1 961	6	10	2500	1 961	6
	GB	10	110	93		10	120	98		10	120	98	
	GSB	10	80	91		10	70	88		10	70	88	
	SG	10	47	52		10	50	52		10	50	52	
0+005,0	HMA	10	2500	2 126	5	10	2500	2 110	6	10	2500	2 110	6
	GB	10	110	94		10	120	97		10	120	97	
	GSB	10	80	97		10	70	94		10	70	94	
	SG	10	47	52		10	50	52		10	50	52	
0+006,0	HMA	10	2500	2 194	4	10	2500	2 024	5	10	2500	2 024	5
	GB	10	110	89		10	120	103		10	120	103	
	GSB	10	80	92		10	70	79		10	70	79	
	SG	10	47	50		10	50	52		10	50	52	
0+007,0	HMA	10	2500	2 234	4	10	2500	2 179	4	10	2500	2 179	4
	GB	10	110	83		10	120	88		10	120	88	
	GSB	10	80	104		10	70	98		10	70	98	
	SG	10	47	47		10	50	48		10	50	48	
0+008,0	HMA	10	2500	2 335	4	10	2500	2 179	5	10	2500	2 179	5



Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	10	110	96		10	120	107		10	120	107	
	GSB	10	80	96		10	70	87		10	70	87	
	SG	10	47	45		10	50	46		10	50	46	
Global	HMA	10	2500	2 485	4	10	2500	2 332	5	-	-	-	-
	GB	10	110	89		10	120	99		-	-	-	
	GSB	10	80	89		10	70	82		-	-	-	
	SG	10	47	49		10	50	50		-	-	-	

Tabla A6.7. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 19

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	30	3400	4 279	3	10	3200	4 066	3	10	3300	3 993	3	10	3300	3 993	3
	GB	30	145	70		10	120	85		10	110	87		10	110	87	
	GSB	30	100	83		10	80	57		10	70	57		10	70	57	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	SG	30	41	31		10	40	45		10	45	45		10	45	45	
0+001,0	HMA	30	3400	2 630	7	10	3200	3 359	3	10	3300	3 267	3	10	3300	3 267	3
	GB	30	145	134		10	120	81		10	110	85		10	110	85	
	GSB	30	100	49		10	80	69		10	70	68		10	70	68	
	SG	30	41	37		10	40	44		10	45	43		10	45	43	
0+002,0	HMA	30	3400	2 862	5	10	3200	3 024	3	10	3300	2 807	3	10	3300	2 807	3
	GB	30	145	99		10	120	83		10	110	94		10	110	94	
	GSB	30	100	74		10	80	79		10	70	74		10	70	74	
	SG	30	41	34		10	40	44		10	45	45		10	45	45	
0+003,0	HMA	30	3400	2 706	4	10	3200	2 880	3	10	3300	2 807	4	10	3300	2 807	4
	GB	30	145	134		10	120	119		10	110	126		10	110	126	
	GSB	30	100	82		10	80	79		10	70	74		10	70	74	
	SG	30	41	33		10	40	44		10	45	45		10	45	45	
0+004,0	HMA	30	3400	3 390	4	10	3200	3 632	3	10	3300	3 684	3	10	3300	3 684	3
	GB	30	145	135		10	120	118		10	110	114		10	110	114	
	GSB	30	100	61		10	80	62		10	70	65		10	70	65	
	SG	30	41	37		10	40	44		10	45	43		10	45	43	
0+005,0	HMA	30	3400	3 326	4	10	3200	3 168	3	10	3300	3 157	3	10	3300	3 157	3



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	30	145	105		10	120	113		10	110	115		10	110	115	
	GSB	30	100	78		10	80	62		10	70	60		10	70	60	
	SG	30	41	31		10	40	43		10	45	44		10	45	44	
0+006,0	HMA	30	3400	3 558	3	10	3200	3 528	2	10	3300	2 970	4	10	3300	2 970	4
	GB	30	145	80		10	120	82		10	110	119		10	110	119	
	GSB	30	100	101		10	80	83		10	70	58		10	70	58	
	SG	30	41	29		10	40	40		10	45	44		10	45	44	
0+007,0	HMA	30	3400	3 558	3	10	3200	3 924	2	10	3300	4 392	2	10	3300	4 392	2
	GB	30	145	131		10	120	107		10	110	83		10	110	83	
	GSB	30	100	40		10	80	49		10	70	59		10	70	59	
	SG	30	41	45		10	40	42		10	45	39		10	45	39	
0+008,0	HMA	30	3400	3 558	3	10	3200	3 795	2	10	3300	3 594	3	10	3300	3 594	3
	GB	30	145	73		10	120	61		10	110	70		10	110	70	
	GSB	30	100	53		10	80	61		10	70	53		10	70	53	
	SG	30	41	41		10	40	40		10	45	41		10	45	41	
Promedio	HMA	30	3400	3 283	4	10	3200	3 464	3	10	3300	3 370	3	-	-	-	-
	GB	30	145	103		10	120	92		10	110	97		-	-	-	
	GSB	30	100	66		10	80	66		10	70	63		-	-	-	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3				Iteración 4			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	SG	30	41	35		10	40	43		10	45	43		-	-	-	



Tabla A6.8. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 20 (iteraciones 1, 2 y 3)

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	30	3250	2 021	5	10	3000	1 953	5	10	2700	2 010	6
	GB	30	135	84		10	120	91		10	120	87	
	GSB	30	100	105		10	80	87		10	70	104	
	SG	30	40	39		10	40	48		10	40	37	
0+001,0	HMA	30	3250	2 079	6	10	3000	2 023	6	10	2700	1 949	6
	GB	30	135	93		10	120	100		10	120	106	
	GSB	30	100	121		10	80	101		10	70	96	
	SG	30	40	34		10	40	43		10	40	44	
0+002,0	HMA	30	3250	2 235	6	10	3000	2 224	6	10	2700	2 118	6
	GB	30	135	83		10	120	87		10	120	97	
	GSB	30	100	139		10	80	136		10	70	111	
	SG	30	40	40		10	40	36		10	40	46	
0+003,0	HMA	30	3250	2 474	5	10	3000	2 170	6	10	2700	2 170	6
	GB	30	135	75		10	120	102		10	120	103	
	GSB	30	100	161		10	80	117		10	70	108	
	SG	30	40	34		10	40	36		10	40	42	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 225 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	30	3250	2 633	5	10	3000	2 539	6	10	2700	2 583	5
	GB	30	135	102		10	120	108		10	120	106	
	GSB	30	100	109		10	80	117		10	70	120	
	SG	30	40	43		10	40	34		10	40	35	
0+005,0	HMA	30	3250	3 250	5	10	3000	3 007	5	10	2700	2 968	5
	GB	30	135	74		10	120	91		10	120	95	
	GSB	30	100	133		10	80	98		10	70	91	
	SG	30	40	30		10	40	42		10	40	43	
0+006,0	HMA	30	3250	2 838	5	10	3000	3 014	4	10	2700	2 842	5
	GB	30	135	78		10	120	69		10	120	78	
	GSB	30	100	97		10	80	98		10	70	90	
	SG	30	40	33		10	40	40		10	40	40	
0+007,0	HMA	30	3250	2 605	4	10	3000	2 679	4	10	2700	2 736	4
	GB	30	135	100		10	120	93		10	120	90	
	GSB	30	100	65		10	80	71		10	70	75	
	SG	30	40	37		10	40	36		10	40	35	
0+008,0	HMA	30	3250	2 991	3	10	3000	2 768	3	10	2700	2 863	3



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	30	135	82		10	120	95		10	120	88	
	GSB	30	100	77		10	80	70		10	70	75	
	SG	30	40	34		10	40	35		10	40	34	
Promedio	HMA	30	3250	2 540	5	10	3000	2 456	5	10	2700	2 441	5
	GB	30	135	85		10	120	92		10	120	94	
	GSB	30	100	108		10	80	97		10	70	96	
	SG	30	40	36		10	40	39		10	40	39	



Tabla A6.9. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 20 (iteraciones 4, 5 y 6)

Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6				
		RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	6	10	2500	1 877	6	10	2400	1 654	6	10	2400	1 654	6
	GB		10	120	98		10	120	115		10	120	115	
	GSB		10	70	96		10	70	78		10	70	78	
	SG		10	45	36		10	45	45		10	45	45	
0+001,0	HMA	6	10	2500	1 924	5	10	2400	1 944	6	10	2400	1 944	6
	GB		10	120	103		10	120	108		10	120	108	
	GSB		10	70	98		10	70	89		10	70	89	
	SG		10	45	47		10	45	48		10	45	48	
0+002,0	HMA	6	10	2500	2 151	6	10	2400	2 071	6	10	2400	2 071	6
	GB		10	120	96		10	120	100		10	120	100	
	GSB		10	70	104		10	70	102		10	70	102	
	SG		10	45	50		10	45	50		10	45	50	
0+003,0	HMA	6	10	2500	2 199	5	10	2400	2 106	6	10	2400	2 106	6
	GB		10	120	98		10	120	108		10	120	108	
	GSB		10	70	106		10	70	95		10	70	95	
	SG		10	45	48		10	45	50		10	45	50	



Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6				
		RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	5	10	2500	2 406	6	10	2400	2 268	5	10	2400	2 268	5
	GB		10	120	122		10	120	125		10	120	125	
	GSB		10	70	90		10	70	93		10	70	93	
	SG		10	45	48		10	45	47		10	45	47	
0+005,0	HMA	5	10	2500	3 089	4	10	2400	3 049	5	10	2400	3 049	5
	GB		10	120	84		10	120	88		10	120	88	
	GSB		10	70	106		10	70	101		10	70	101	
	SG		10	45	41		10	45	42		10	45	42	
0+006,0	HMA	5	10	2500	2 949	4	10	2400	2 774	5	10	2400	2 774	5
	GB		10	120	71		10	120	83		10	120	83	
	GSB		10	70	98		10	70	85		10	70	85	
	SG		10	45	39		10	45	40		10	45	40	
0+007,0	HMA	4	10	2500	2 729	4	10	2400	2 744	4	10	2400	2 744	4
	GB		10	120	90		10	120	93		10	120	93	
	GSB		10	70	73		10	70	70		10	70	70	
	SG		10	45	36		10	45	36		10	45	36	
0+008,0	HMA	3	10	2500	2 797	3	10	2400	2 733	3	10	2400	2 733	3



Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6				
		RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB		10	120	94		10	120	99		10	120	99	
	GSB		10	70	71		10	70	67		10	70	67	
	SG		10	45	35		10	45	35		10	45	35	
Promedio	HMA	5	10	2500	2 421	5	10	2400	2 329	5	-	-	-	-
	GB		10	120	94		10	120	101		-	-	-	
	GSB		10	70	93		10	70	86		-	-	-	
	SG		10	45	42		10	45	43		-	-	-	



Tabla A6.10. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 21 (iteraciones 1, 2 y 3)

Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	30	3200	2 047	5	10	3000	1 998	4	10	2700	2 018	5
	GB	30	130	90		10	120	96		10	130	93	
	GSB	30	110	133		10	90	104		10	70	122	
	SG	30	38	32		10	40	45		10	40	36	
0+001,0	HMA	30	3200	2 731	5	10	3000	2 583	6	10	2700	2 566	5
	GB	30	130	72		10	120	86		10	130	91	
	GSB	30	110	158		10	90	133		10	70	104	
	SG	30	38	32		10	40	33		10	40	45	
0+002,0	HMA	30	3200	2 795	5	10	3000	2 565	6	10	2700	2 658	5
	GB	30	130	76		10	120	96		10	130	89	
	GSB	30	110	145		10	90	111		10	70	116	
	SG	30	38	32		10	40	35		10	40	36	
0+003,0	HMA	30	3200	2 592	5	10	3000	2 613	4	10	2700	2 499	5
	GB	30	130	77		10	120	72		10	130	84	
	GSB	30	110	163		10	90	178		10	70	143	
	SG	30	38	33		10	40	33		10	40	36	



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	30	3200	2 661	5	10	3000	2 460	6	10	2700	2 304	6
	GB	30	130	76		10	120	96		10	130	111	
	GSB	30	110	168		10	90	129		10	70	98	
	SG	30	38	33		10	40	35		10	40	47	
0+005,0	HMA	30	3200	2 783	8	10	3000	2 732	7	10	2700	2 740	7
	GB	30	130	80		10	120	81		10	130	81	
	GSB	30	110	111		10	90	107		10	70	110	
	SG	30	38	35		10	40	39		10	40	37	
0+006,0	HMA	30	3200	2 795	5	10	3000	2 774	4	10	2700	2 679	4
	GB	30	130	82		10	120	84		10	130	90	
	GSB	30	110	87		10	90	74		10	70	69	
	SG	30	38	32		10	40	44		10	40	44	
0+007,0	HMA	30	3200	3 370	2	10	3000	3 267	3	10	2700	2 984	3
	GB	30	130	76		10	120	83		10	130	99	
	GSB	30	110	92		10	90	83		10	70	74	
	SG	30	38	36		10	40	37		10	40	38	
0+008,0	HMA	30	3200	3 021	3	10	3000	3 414	3	10	2700	3 087	3



Estación	Capa	Iteración 1				Iteración 2				Iteración 3			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	30	130	97		10	120	73		10	130	95	
	GSB	30	110	56		10	90	71		10	70	57	
	SG	30	38	38		10	40	36		10	40	38	
Global	HMA	30	3200	2 734	5	10	3000	2 683	5	10	2700	2 596	5
	GB	30	130	80		10	120	85		10	130	92	
	GSB	30	110	117		10	90	106		10	70	95	
	SG	30	38	34		10	40	37		10	40	39	



Tabla A6.11. Detalle de retrocálculo de módulo inicial para el tramo 21 (iteraciones 4, 5 y 6)

Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+000,0	HMA	10	2600	2 016	5	10	2600	1 988	5	10	2600	1 988	5
	GB	10	120	93		10	120	96		10	120	96	
	GSB	10	70	119		10	70	103		10	70	103	
	SG	10	36	37		10	40	46		10	50	46	
0+001,0	HMA	10	2600	2 452	5	10	2600	2 428	6	10	2600	2 428	6
	GB	10	120	95		10	120	101		10	120	101	
	GSB	10	70	106		10	70	95		10	70	95	
	SG	10	36	44		10	40	46		10	50	46	
0+002,0	HMA	10	2600	2 575	5	10	2600	2 506	6	10	2600	2 506	6
	GB	10	120	93		10	120	102		10	120	102	
	GSB	10	70	103		10	70	89		10	70	89	
	SG	10	36	44		10	40	47		10	50	47	
0+003,0	HMA	10	2600	2 322	5	10	2600	2 499	5	10	2600	2 499	5
	GB	10	120	99		10	120	88		10	120	88	
	GSB	10	70	121		10	70	116		10	70	116	
	SG	10	36	38		10	40	46		10	50	46	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 234 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
0+004,0	HMA	10	2600	2 323	6	10	2600	2 457	5	10	2600	2 457	5
	GB	10	120	110		10	120	100		10	120	100	
	GSB	10	70	103		10	70	108		10	70	108	
	SG	10	36	43		10	40	46		10	50	46	
0+005,0	HMA	10	2600	2 978	6	10	2600	2 905	6	10	2600	2 905	6
	GB	10	120	64		10	120	73		10	120	73	
	GSB	10	70	138		10	70	106		10	70	106	
	SG	10	36	36		10	40	46		10	50	46	
0+006,0	HMA	10	2600	2 704	5	10	2600	2 581	5	10	2600	2 581	5
	GB	10	120	90		10	120	98		10	120	98	
	GSB	10	70	81		10	70	65		10	70	65	
	SG	10	36	32		10	40	45		10	50	45	
0+007,0	HMA	10	2600	2 997	3	10	2600	3 040	3	10	2600	3 040	3
	GB	10	120	100		10	120	97		10	120	97	
	GSB	10	70	73		10	70	74		10	70	74	
	SG	10	36	38		10	40	38		10	50	38	
0+008,0	HMA	10	2600	3 029	4	10	2600	2 973	4	10	2600	2 973	4



Estación	Capa	Iteración 4				Iteración 5				Iteración 6			
		Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %	Rango de búsqueda %	Módulo semilla MPa	Módulo calculado MPa	RMS %
	GB	10	120	100		10	120	102		10	120	102	
	GSB	10	70	53		10	70	54		10	70	54	
	SG	10	36	39		10	40	38		10	50	38	
Promedio	HMA	10	2600	2 577	5	10	2600	2 578	5	-	-	-	-
	GB	10	120	93		10	120	95		-	-	-	
	GSB	10	70	96		10	70	87		-	-	-	
	SG	10	36	39		10	40	44		-	-	-	



Anexo 7: FWD vs RSD

Análisis comparativo de Deflectometría entre metodologías FWD y RSD

Los análisis de Varianza fueron realizados con cada uno de los tramos HVS, con referencia a los resultados de deflectometría FWD se utilizaron todos los resultados obtenidos y para el caso de los resultados de deflectometría RSD se filtraron los resultados y se utilizaron solo las lecturas de las estaciones externas (CL1 y CL5), debido a las diferencias con las lecturas de las estaciones intermedias que fueron explicadas dentro del Capítulo 6. Cabe aclarar, que los análisis de varianza (ANOVA) fueron realizados empleando los promedios aritméticos de todas las estaciones para cada uno de los tramos en cada estado en particular (estado inicial o final del análisis), los análisis de varianza (ANOVA) se realizaron por medio del análisis Tukey y Fisher, así mismo, se muestran los histogramas de residuales y los gráficos de intervalos de dispersión de valores de medias para cada uno de los tramos, en condición inicial y condición final.

Tramo 015

Geófono D1

El análisis comparativo para el tramo 015 en condiciones y finales para el geófono D1 se muestra en la Figura A7.1 y Figura A7.2, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.3 y Figura A7.4.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15.Ini	27	798.50	A
RSD,15.Ini	6	768.0	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15.Ini	27	798.50	A
RSD,15.Ini	6	768.0	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

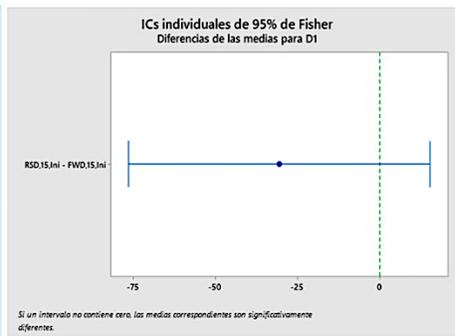
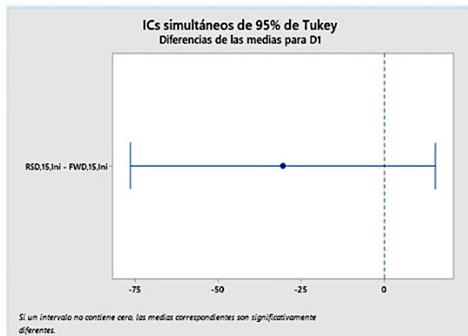


Figura A7.1. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 015 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,15,Fin	6	1638.0	A
FWD,15,Fin	24	1082.9	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,15,Fin	6	1638.0	A
FWD,15,Fin	24	1082.9	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

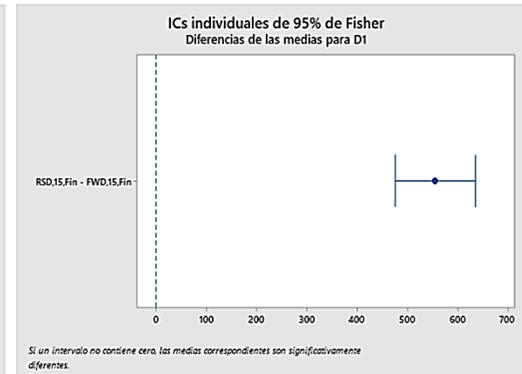
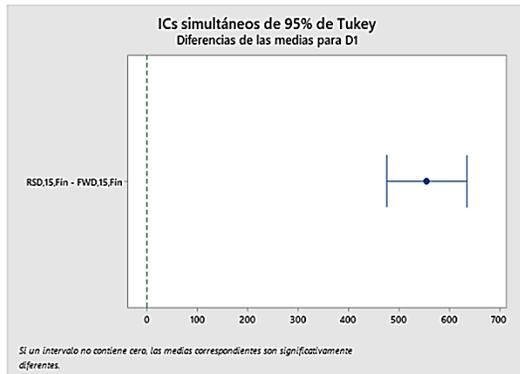


Figura A7.2. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 015 en condiciones finales.

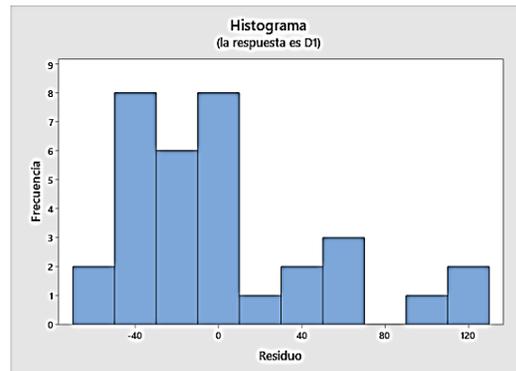
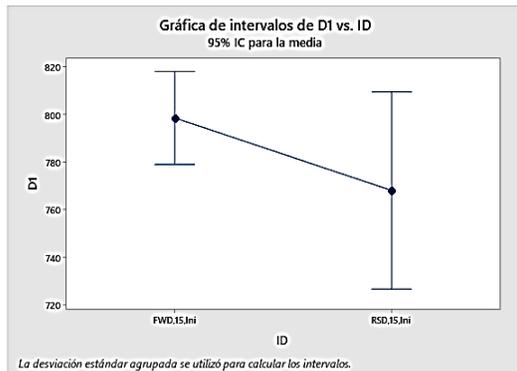


Figura A7.3. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 015 en condiciones iniciales

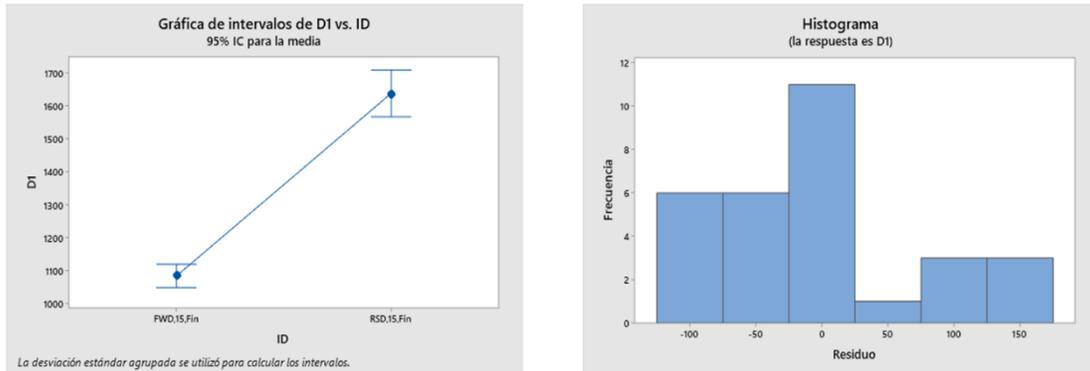


Figura A7.4. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 015 en condiciones finales

Geófono D4

El análisis comparativo para el tramo 015 en condiciones y finales para el geófono D4 se muestra en la Figura A7.5 y Figura A7.6, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.7 y Figura A7.8.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Ini	27	411.51	A
RSD,15,Ini	6	365.50	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Ini	27	411.51	A
RSD,15,Ini	6	365.50	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

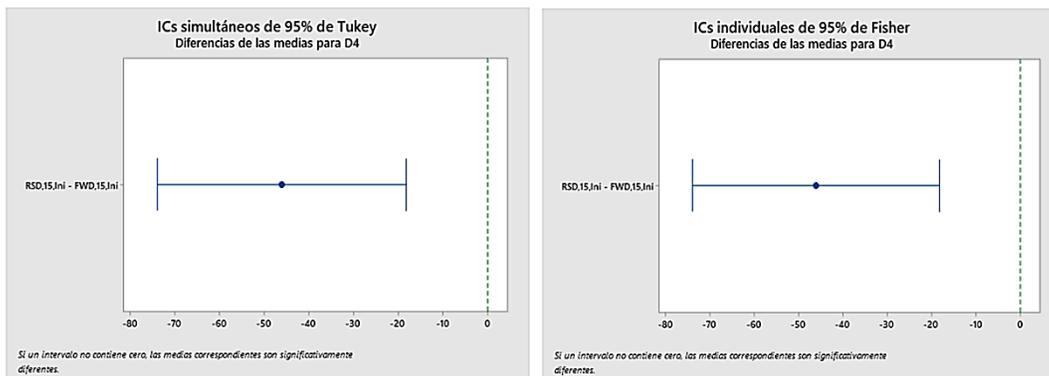


Figura A7.5. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 015 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,15,Fin	6	526.00	A
FWD,15,Fin	24	507.74	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,15,Fin	6	526.00	A
FWD,15,Fin	24	507.74	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

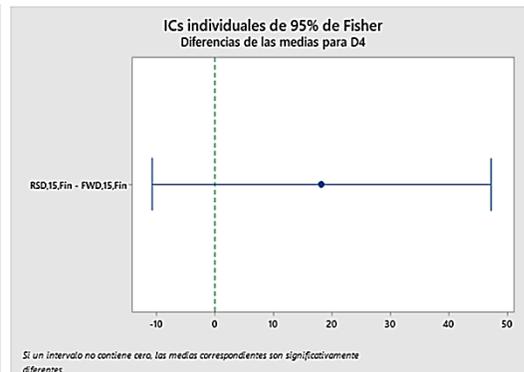
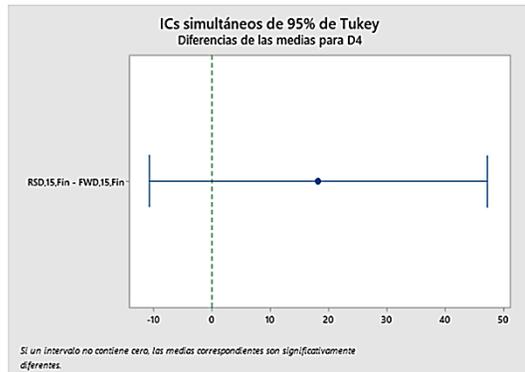


Figura A7.6. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 015 en condiciones finales.

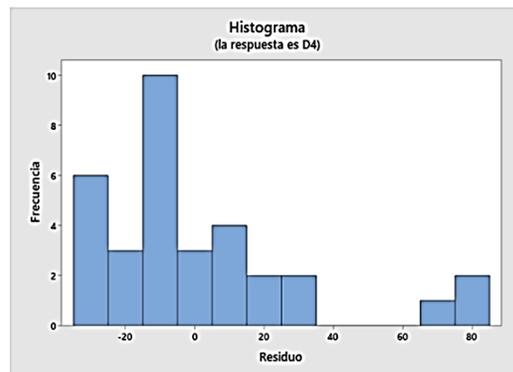
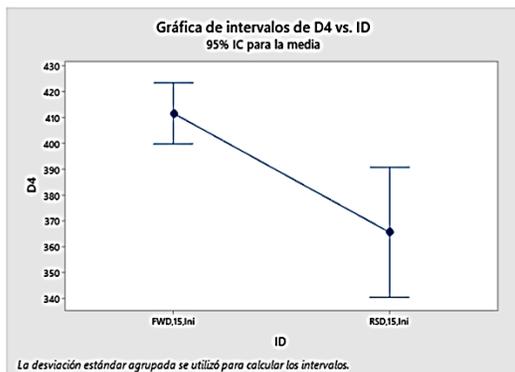


Figura A7.7. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 015 en condiciones iniciales

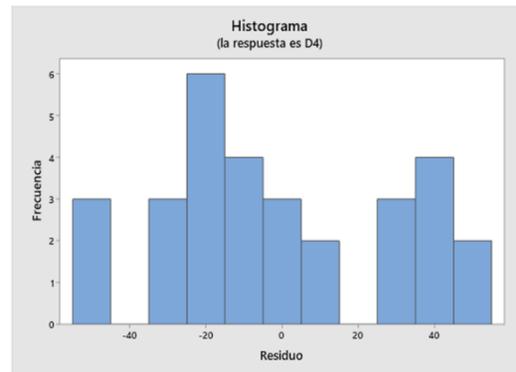
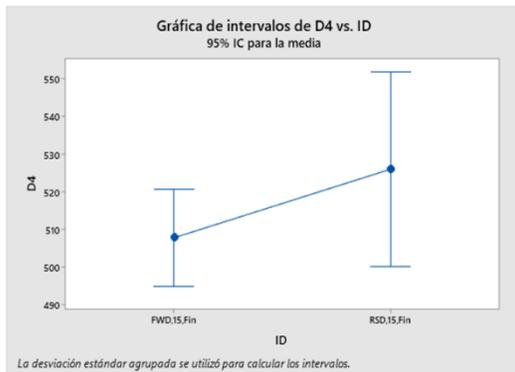


Figura A7.8. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 015 en condiciones finales

Geófono D6

El análisis comparativo para el tramo 015 en condiciones y finales para el geófono D6 se muestra en la **Figura A7.9** y **Figura A7.10**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.11** y **Figura A7.12**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Ini	27	169.26	A
RSD,15,Ini	6	90.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Ini	27	169.26	A
RSD,15,Ini	6	90.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

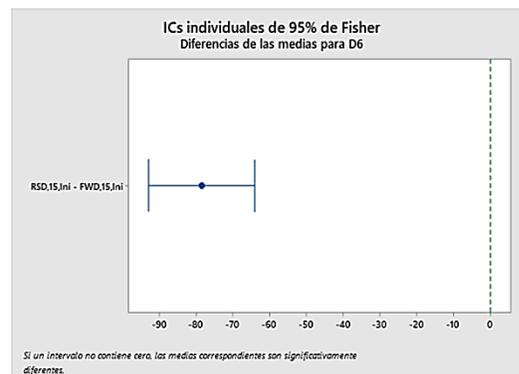
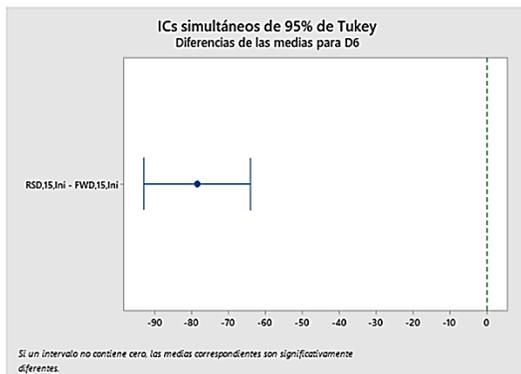


Figura A7.9. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 015 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Fin	24	194.43	A
RSD,15,Fin	6	99.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Fin	24	194.43	A
RSD,15,Fin	6	99.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

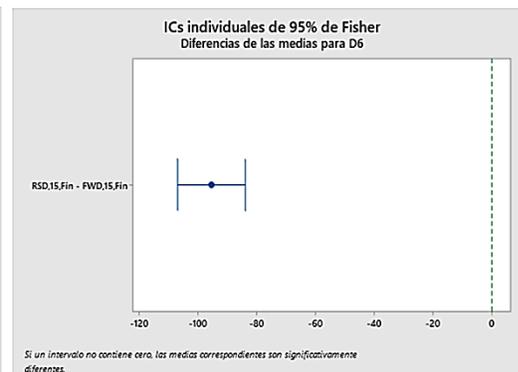
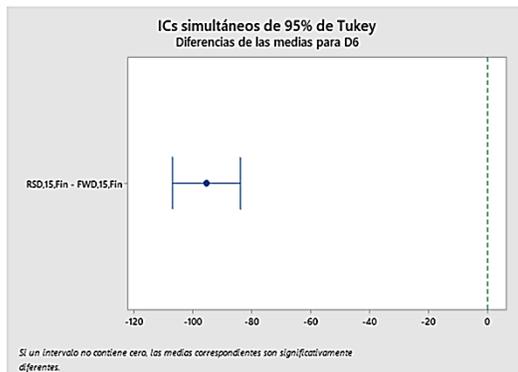


Figura A7.10. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 015 en condiciones finales.

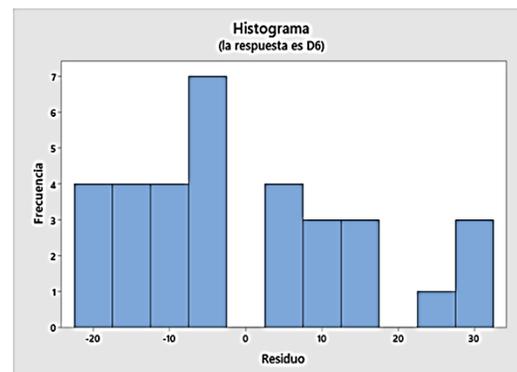
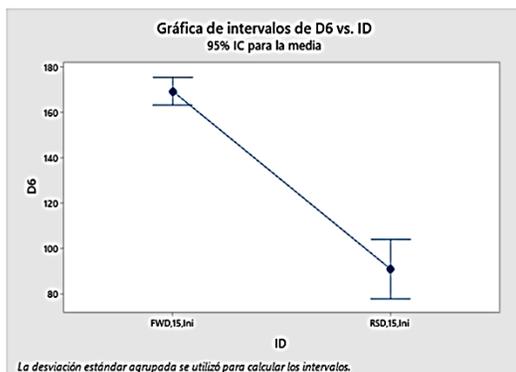


Figura A7.11. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 015 en condiciones iniciales

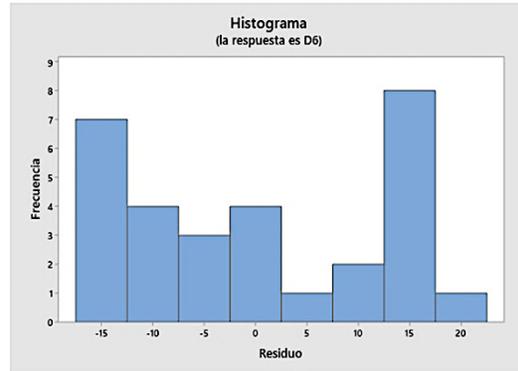
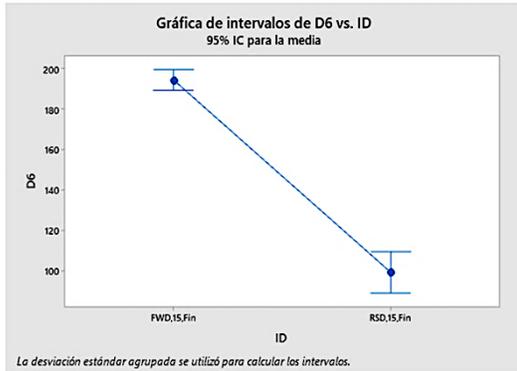


Figura A7.12. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 015 en condiciones finales

Geófono D9

El análisis comparativo para el tramo 015 en condiciones y finales para el geófono D9 se muestra en la Figura A7.13 y Figura A7.14, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.15 y Figura A7.16.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Ini	27	110.31	A
RSD,15,Ini	6	31.00	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Ini	27	110.31	A
RSD,15,Ini	6	31.00	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

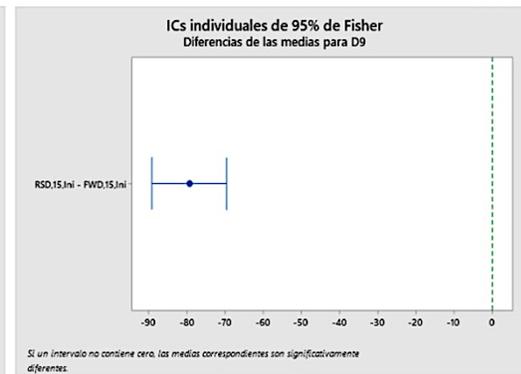
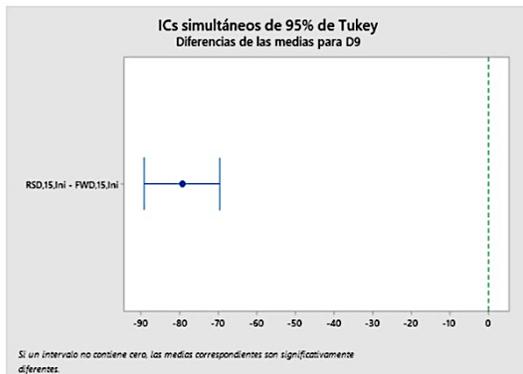


Figura A7.13. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 015 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Fin	24	68.713	A
RSD,15,Fin	6	15.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,15,Fin	24	68.713	A
RSD,15,Fin	6	15.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

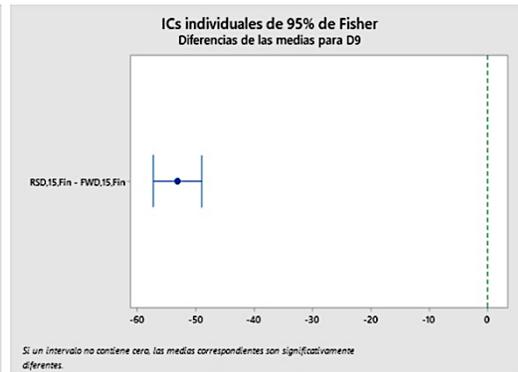
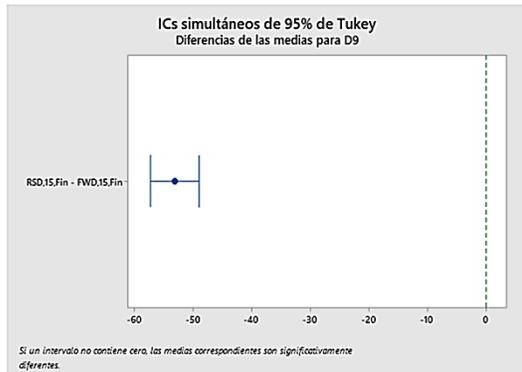


Figura A7.14. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 015 en condiciones finales.

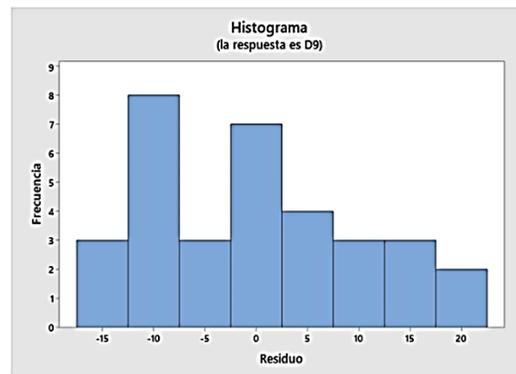
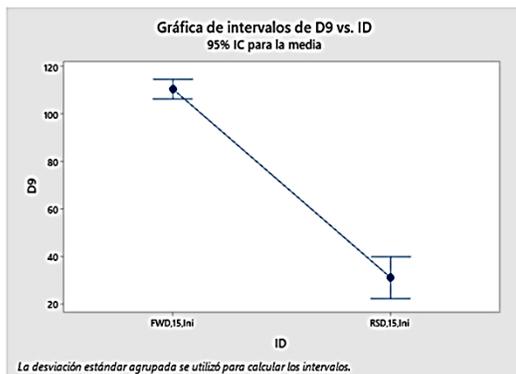


Figura A7.15. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 015 en condiciones iniciales

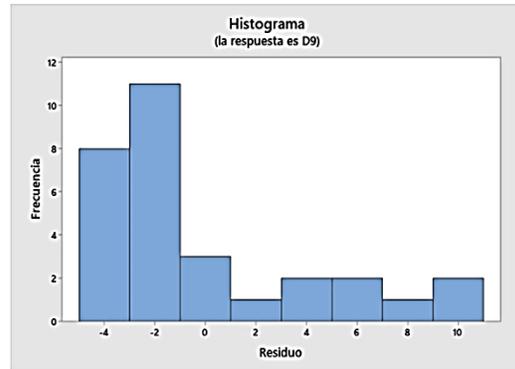
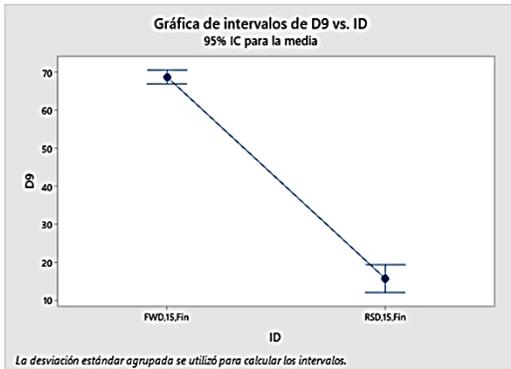


Figura A7.16. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 015 en condiciones finales

Tramo 016

Geófono D1

El análisis comparativo para el tramo 016 en condiciones y finales para el geófono D1 se muestra en la Figura A7.17 y Figura A7.18, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.19 y Figura A7.20.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	869.12	A
RSD,16,Ini	6	867.3	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	869.12	A
RSD,16,Ini	6	867.3	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

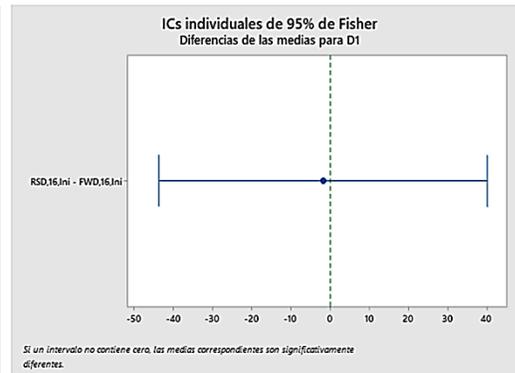
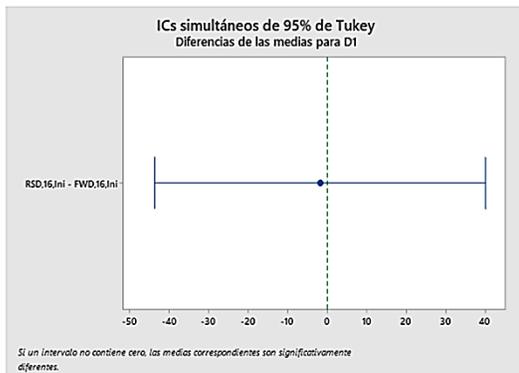


Figura A7.17. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 016 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,16,Fin	6	1713.0	A
FWD,16,Fin	24	1133.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,16,Fin	6	1713.0	A
FWD,16,Fin	24	1133.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

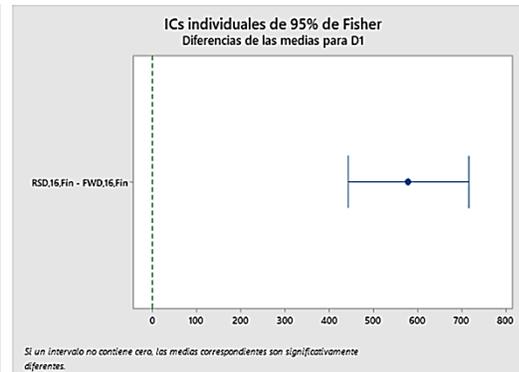
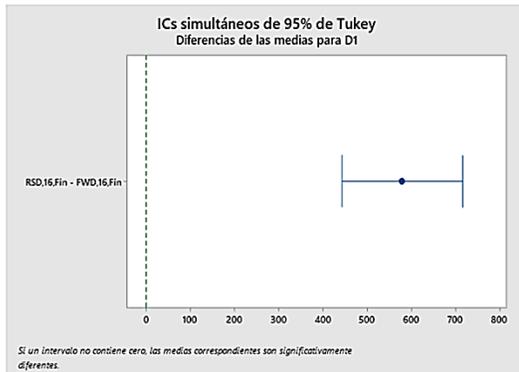


Figura A7.18. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 016 en condiciones finales.

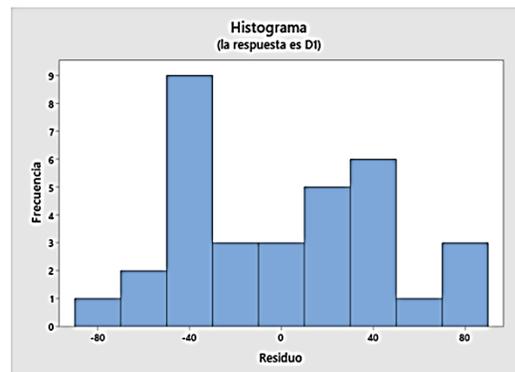
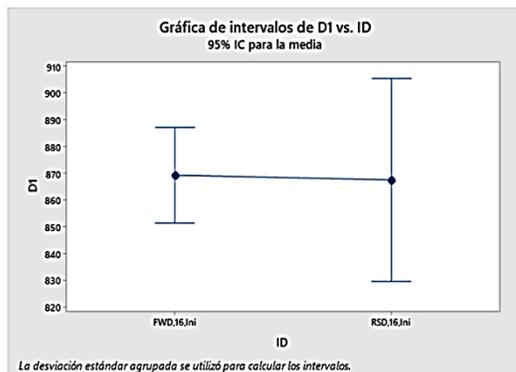


Figura A7.19. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 016 en condiciones iniciales

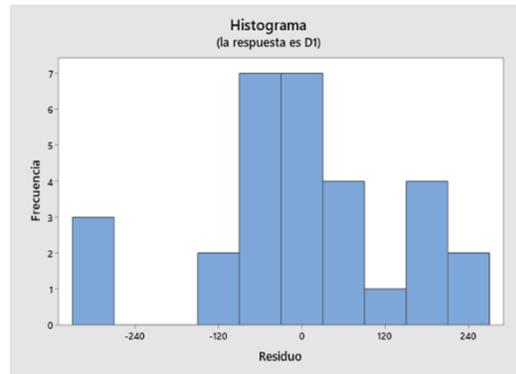
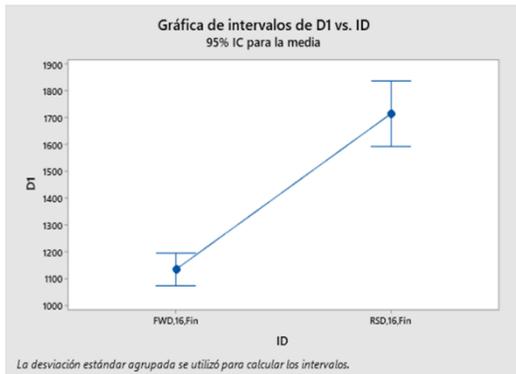


Figura A7.20. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 016 en condiciones finales

Geófono D4

El análisis comparativo para el tramo 016 en condiciones y finales para el geófono D4 se muestra en la Figura A7.21 y Figura A7.22, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.23 y Figura A7.24.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	393.26	A
RSD,16,Ini	6	342.0	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	393.26	A
RSD,16,Ini	6	342.0	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

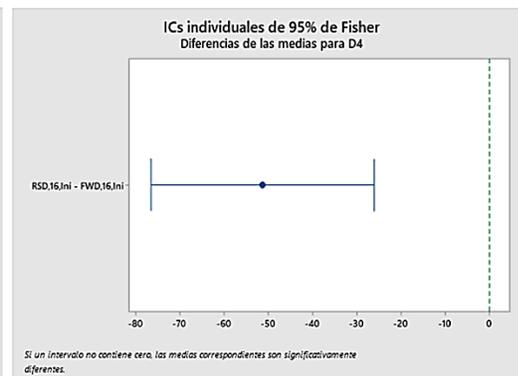
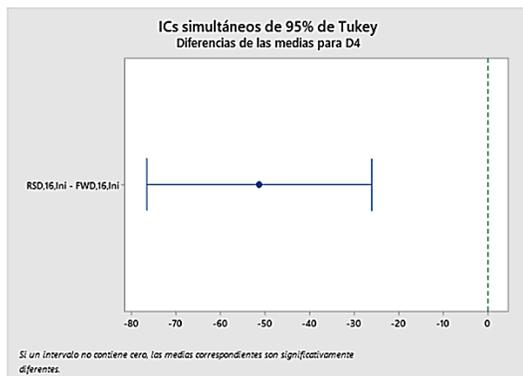


Figura A7.21. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 016 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,16,Fin	6	648.8	A
FWD,16,Fin	24	496.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,16,Fin	6	648.8	A
FWD,16,Fin	24	496.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

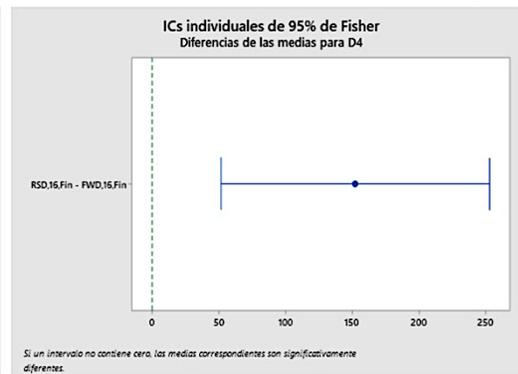
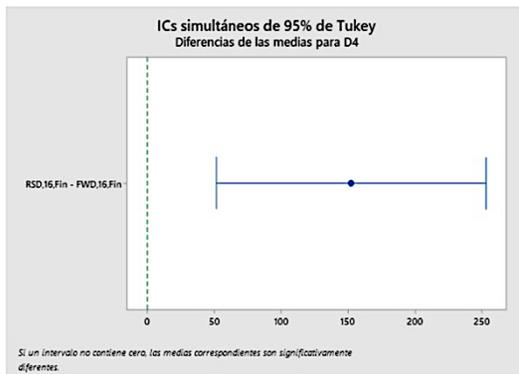


Figura A7.22. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 016 en condiciones finales.

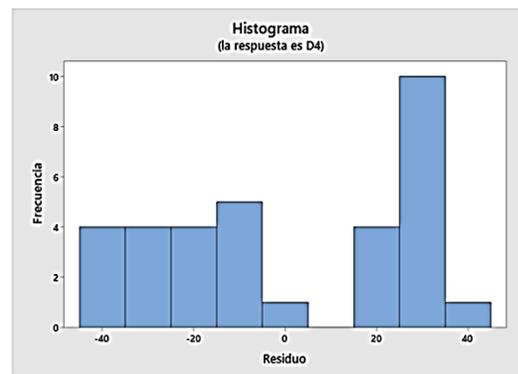
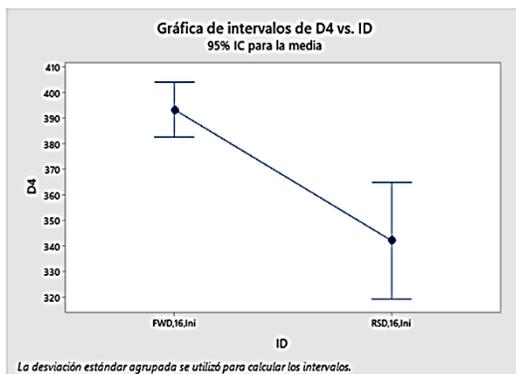


Figura A7.23. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 016 en condiciones iniciales

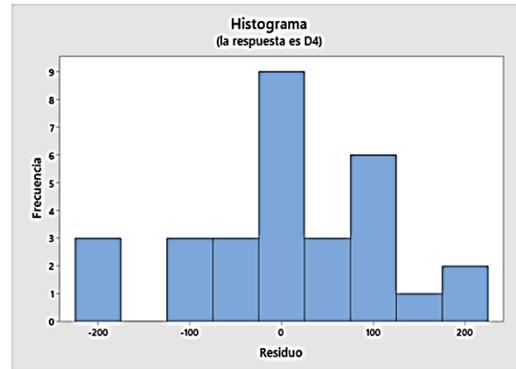
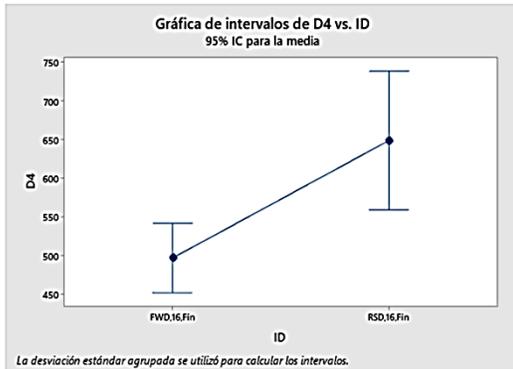


Figura A7.24. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 016 en condiciones finales

Geófono D6

El análisis comparativo para el tramo 016 en condiciones y finales para el geófono D6 se muestra en la **Figura A7.25** y **Figura A7.26**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.27** y **Figura A7.28**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	168.22	A
RSD,16,Ini	6	100.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	168.22	A
RSD,16,Ini	6	100.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

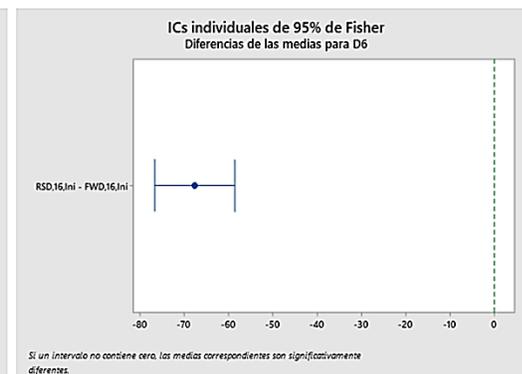
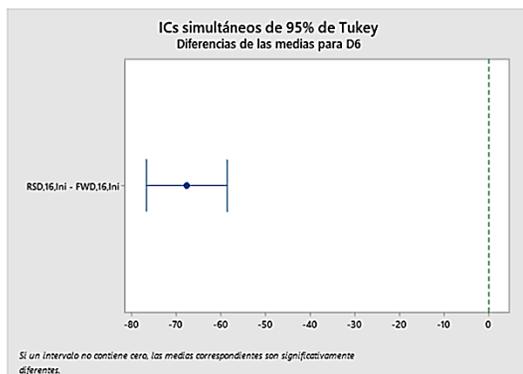


Figura A7.25. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 016 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Fin	24	183.41	A
RSD,16,Fin	6	132.3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Fin	24	183.41	A
RSD,16,Fin	6	132.3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

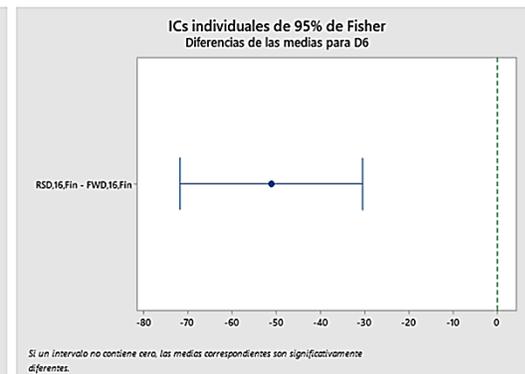
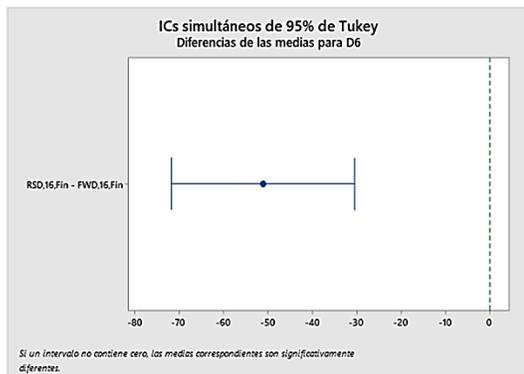


Figura A7.26. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 016 en condiciones finales.

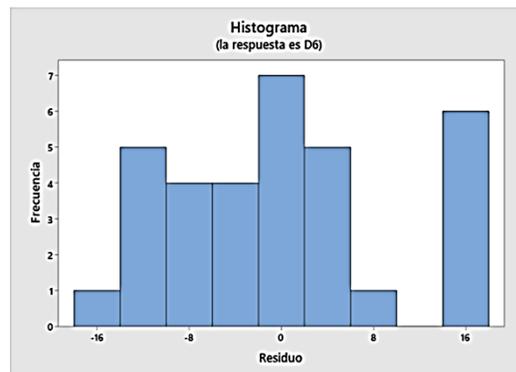
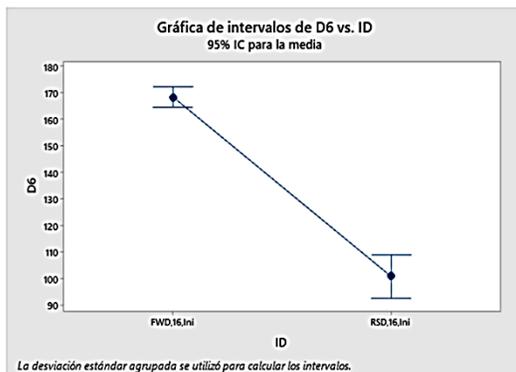


Figura A7.27. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 016 en condiciones iniciales

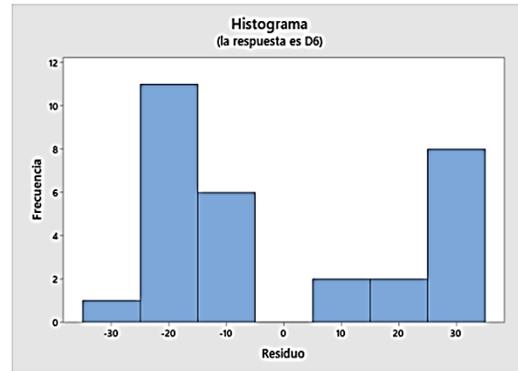
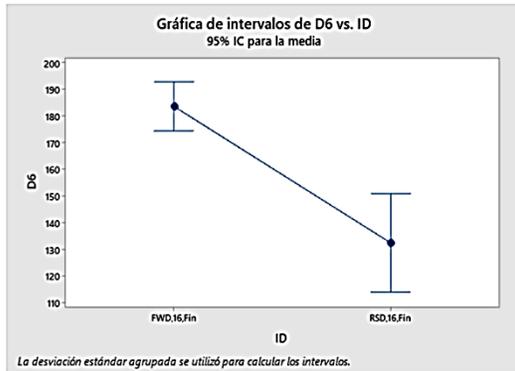


Figura A7.28. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 016 en condiciones finales

Geófono D9

El análisis comparativo para el tramo 016 en condiciones y finales para el geófono D9 se muestra en la Figura A7.29 y Figura A7.30, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.31 y Figura A7.32.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	73.004	A
RSD,16,Ini	15	23.733	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Ini	27	73.004	A
RSD,16,Ini	15	23.733	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

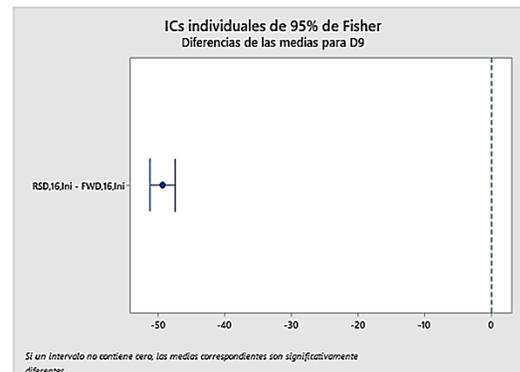
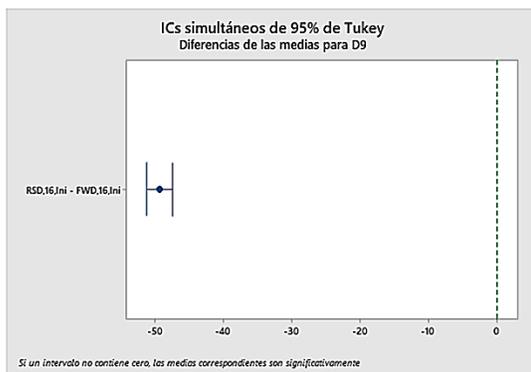


Figura A7.29. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 016 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Fin	24	75.59	A
RSD,16,Fin	6	20.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,16,Fin	24	75.59	A
RSD,16,Fin	6	20.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

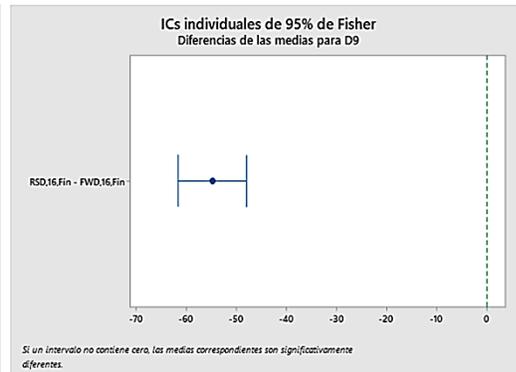
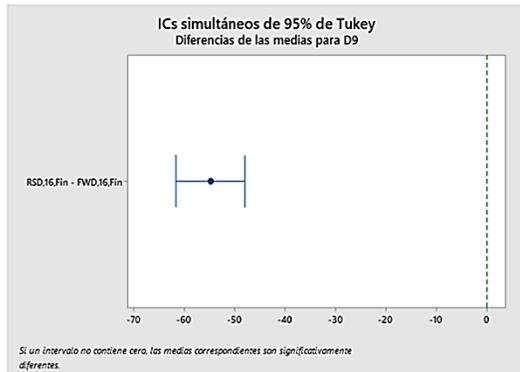


Figura A7.30. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 016 en condiciones finales.

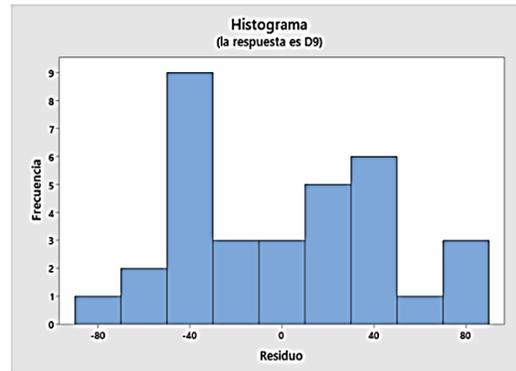
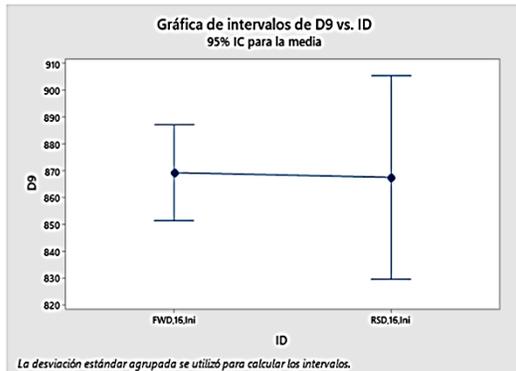


Figura A7.31. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 016 en condiciones iniciales

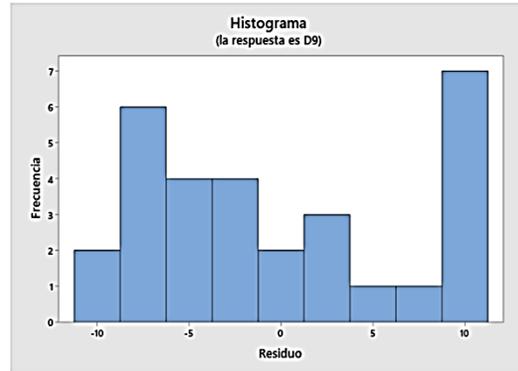
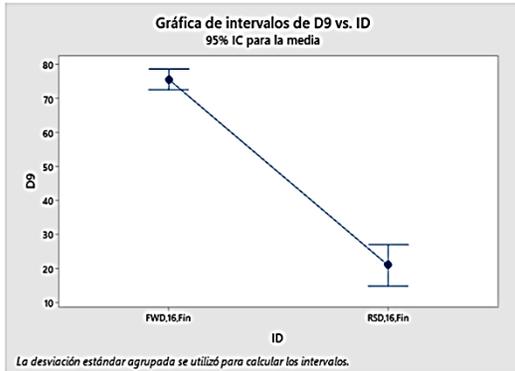


Figura A7.32. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 016 en condiciones finales

Tramo 017

Geófono D1

El análisis comparativo para el tramo 017 en condiciones y finales para el geófono D1 se muestra en la Figura A7.33 y Figura A7.34, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.35 y Figura A7.36.

Comparaciones en parejas de Tukey

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,17,Ini	6	816.83	A
FWD,17,Ini	27	803.50	A

ID	N	Media	Agrupación
RSD,17,Ini	6	816.83	A
FWD,17,Ini	27	803.50	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

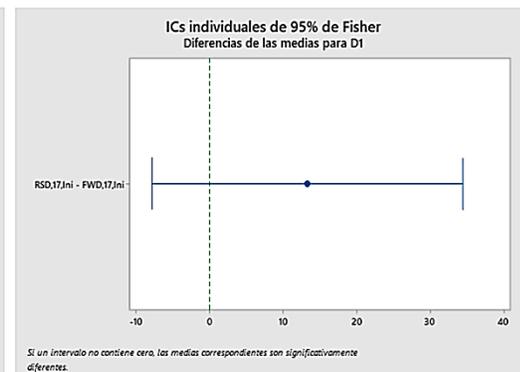
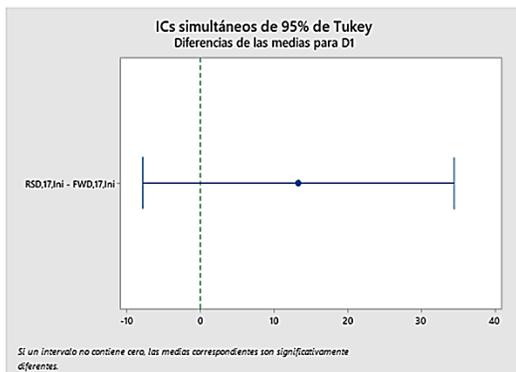


Figura A7.33. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 017 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,17,Fin	6	1651.7	A
FWD,17,Fin	24	971.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,17,Fin	6	1651.7	A
FWD,17,Fin	24	971.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

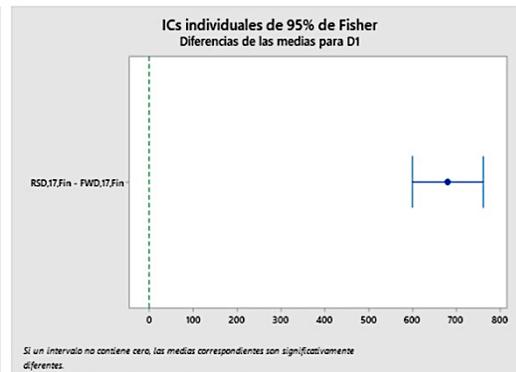
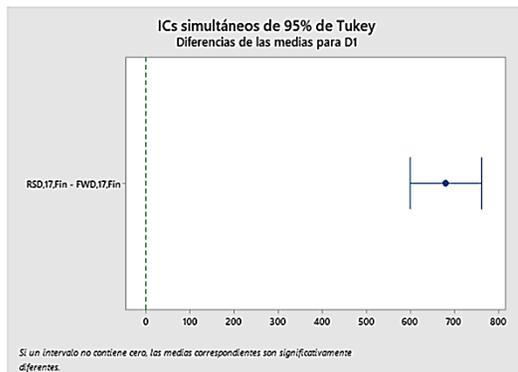


Figura A7.34. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 017 en condiciones finales.

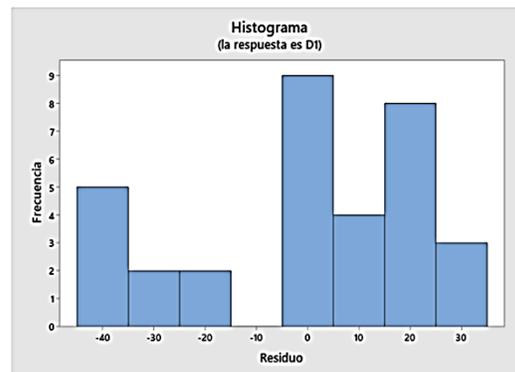
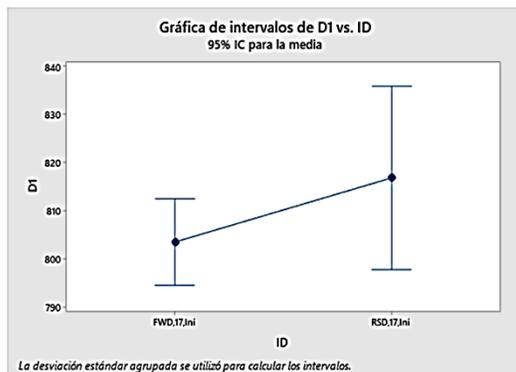


Figura A7.35. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 017 en condiciones iniciales

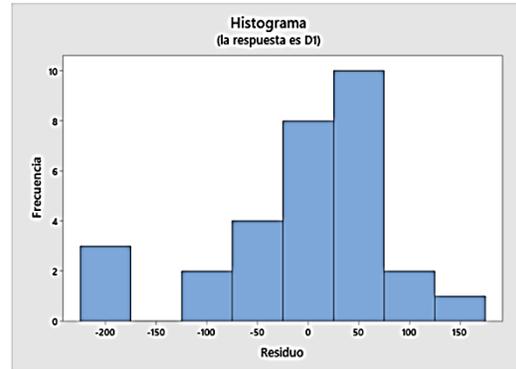
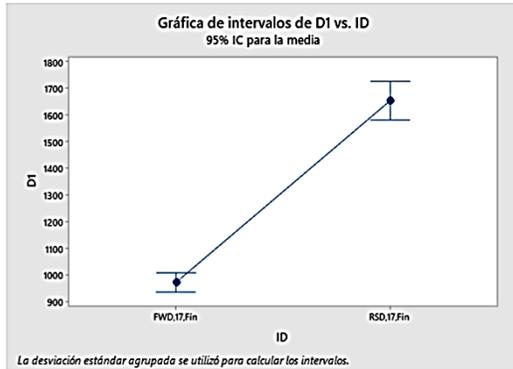


Figura A7.36. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 017 en condiciones finales

Geófono D4

El análisis comparativo para el tramo 017 en condiciones y finales para el geófono D4 se muestra en la **Figura A7.37** y **Figura A7.38**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.39** y **Figura A7.40**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Ini	27	367.56	A
RSD,17,Ini	6	334.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Ini	27	367.56	A
RSD,17,Ini	6	334.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

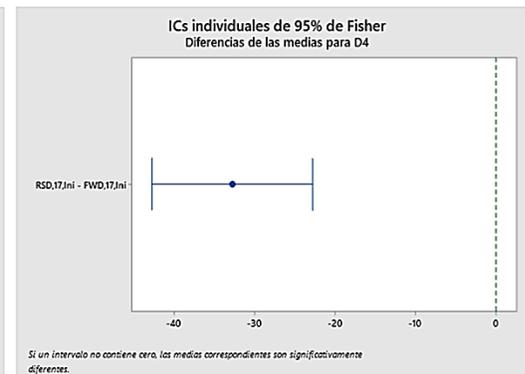
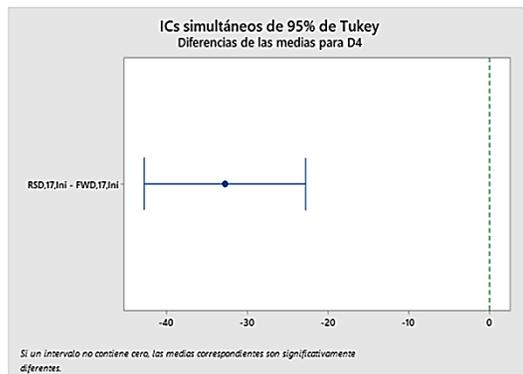


Figura A7.37. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 017 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media Agrupación
FWD,17,Fin	24	423.04 A
RSD,17,Fin	6	415.17 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media Agrupación
FWD,17,Fin	24	423.04 A
RSD,17,Fin	6	415.17 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

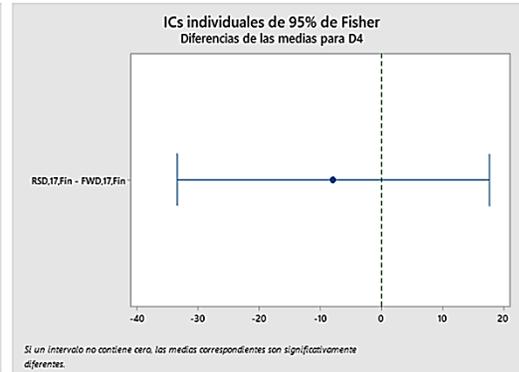
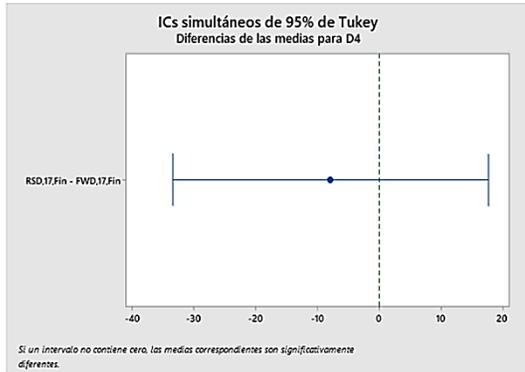


Figura A7.38. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 017 en condiciones finales.

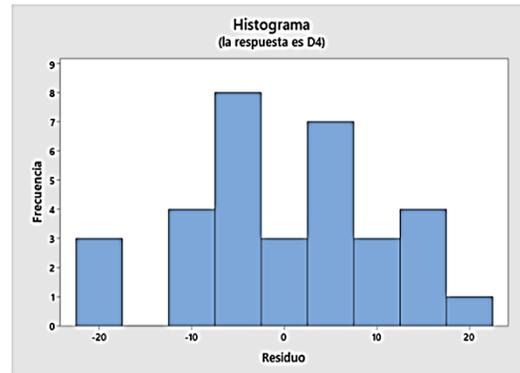
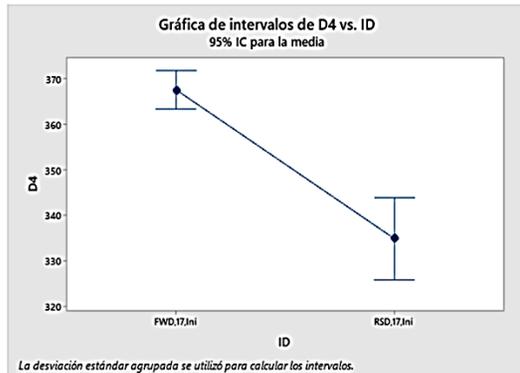


Figura A7.39. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 017 en condiciones iniciales

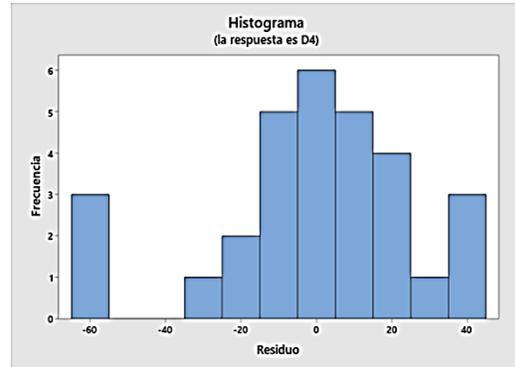
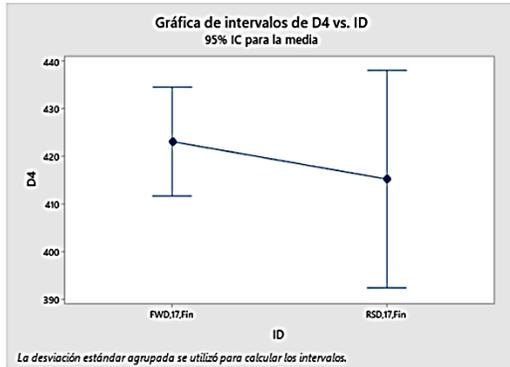


Figura A7.40. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 017 en condiciones finales

Geófono D6

El análisis comparativo para el tramo 017 en condiciones y finales para el geófono D6 se muestra en la Figura A7.41 y Figura A7.42, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.43 y Figura A7.44.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Ini	27	161.14	A
RSD,17,Ini	6	91.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Ini	27	161.14	A
RSD,17,Ini	6	91.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

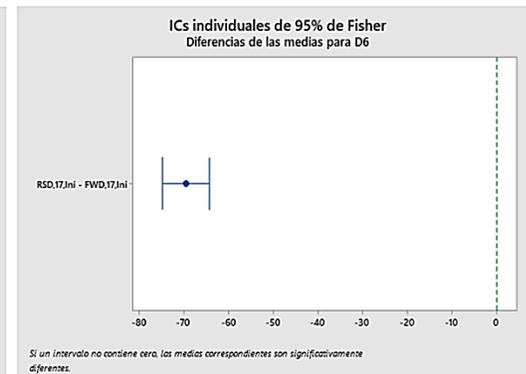
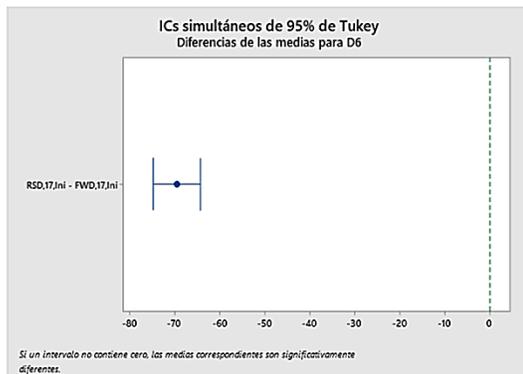


Figura A7.41. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 017 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Fin	24	162.57	A
RSD,17,Fin	6	94.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Fin	24	162.57	A
RSD,17,Fin	6	94.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

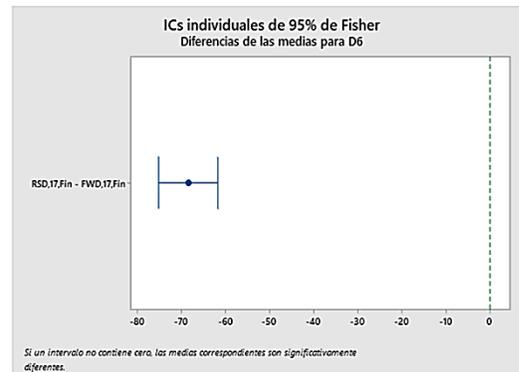
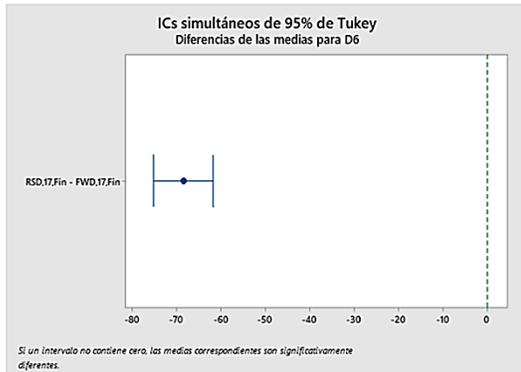


Figura A7.42. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 017 en condiciones finales.

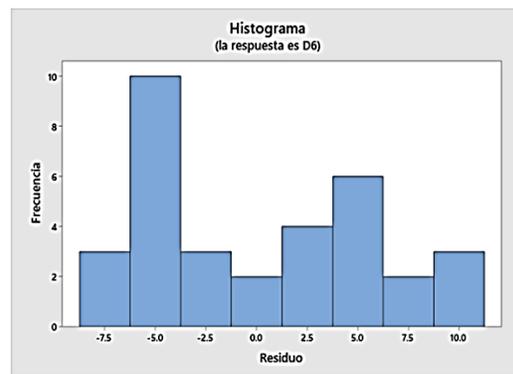
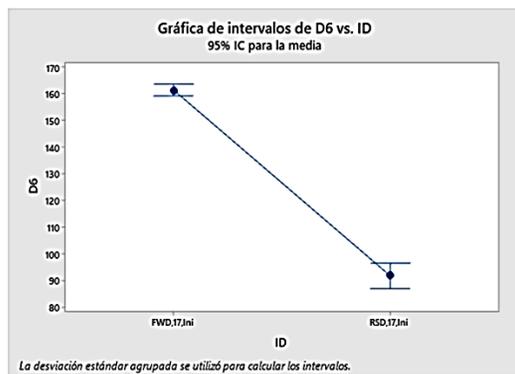


Figura A7.43. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 017 en condiciones iniciales

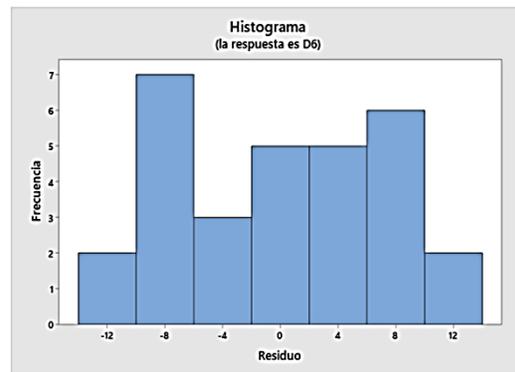
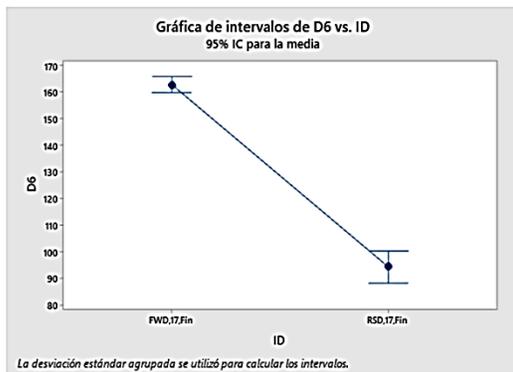


Figura A7.44. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 017 en condiciones finales

Geófono D9

El análisis comparativo para el tramo 017 en condiciones y finales para el geófono D9 se muestra en la Figura A7.45 y Figura A7.46, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.47 y Figura A7.48.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Ini	27	71.174	A
RSD,17,Ini	6	25.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Ini	27	71.174	A
RSD,17,Ini	6	25.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

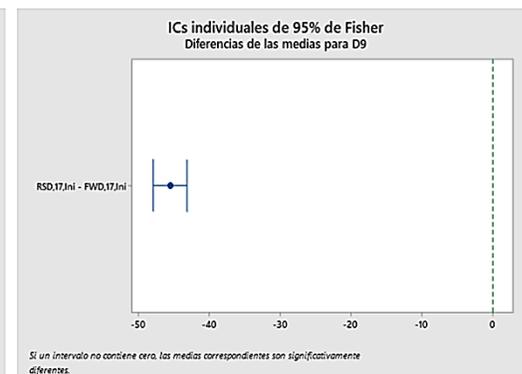
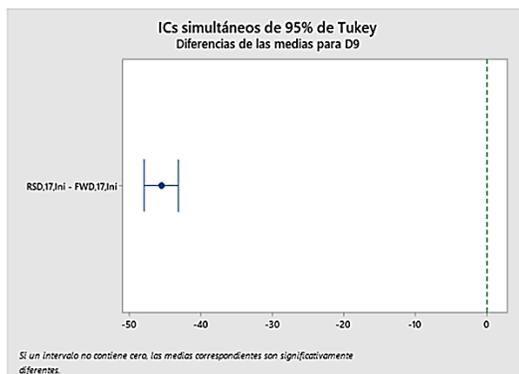


Figura A7.45. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 017 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Fin	24	66.483	A
RSD,17,Fin	6	19.33	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,17,Fin	24	66.483	A
RSD,17,Fin	6	19.33	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

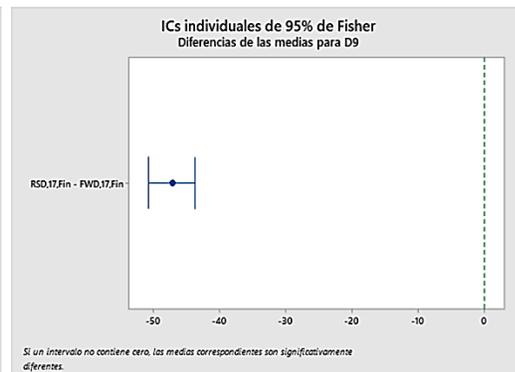
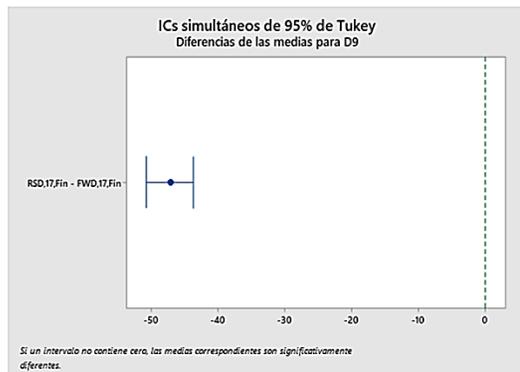


Figura A7.46. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 017 en condiciones finales.

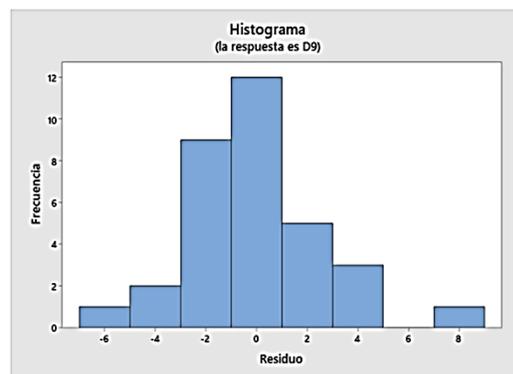
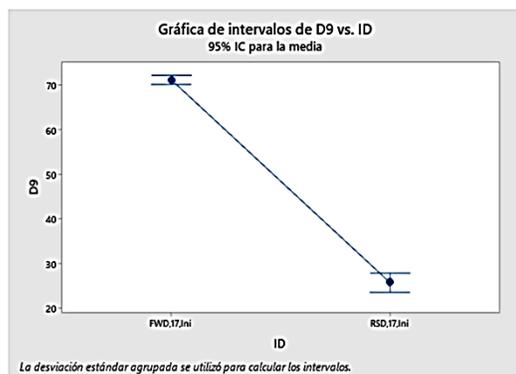


Figura A7.47. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 017 en condiciones iniciales

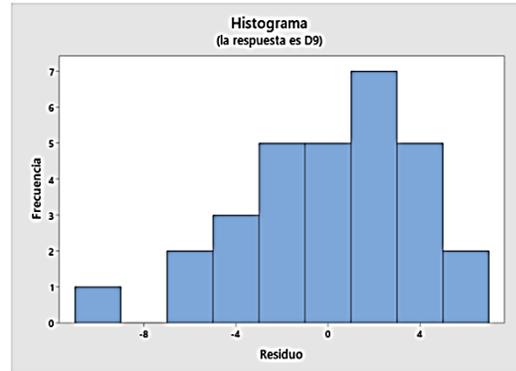
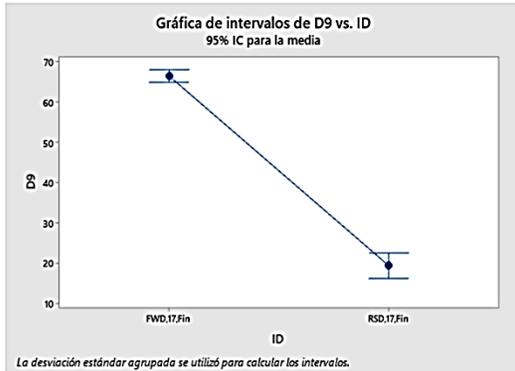


Figura A7.48. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 017 en condiciones finales

Tramo 019

Geófono D1

El análisis comparativo para el tramo 019 en condiciones y finales para el geófono D1 se muestra en la Figura A7.49 y Figura A7.50, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.51 y Figura A7.52.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	24	791.72	A
RSD,19,Ini	6	738.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	24	791.72	A
RSD,19,Ini	6	738.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

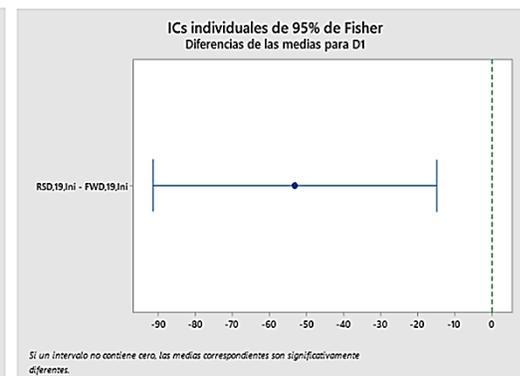
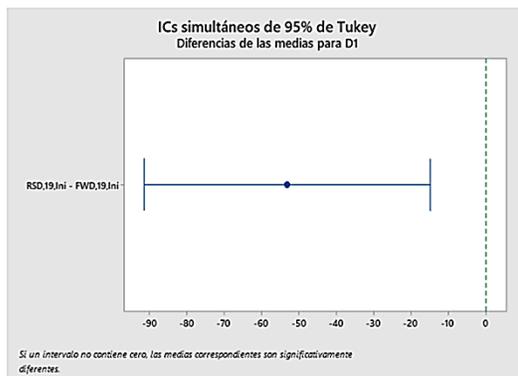


Figura A7.49. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 019 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,19,Fin	6	1559.3	A
FWD,19,Fin	24	944.09	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,19,Fin	6	1559.3	A
FWD,19,Fin	24	944.09	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

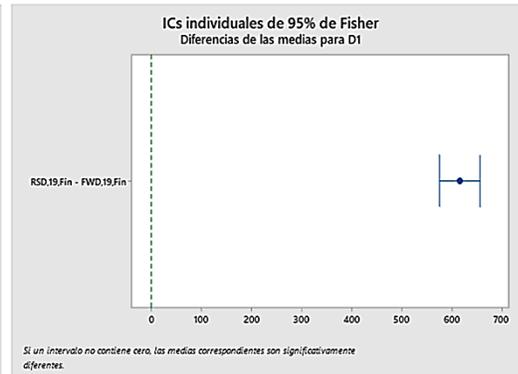
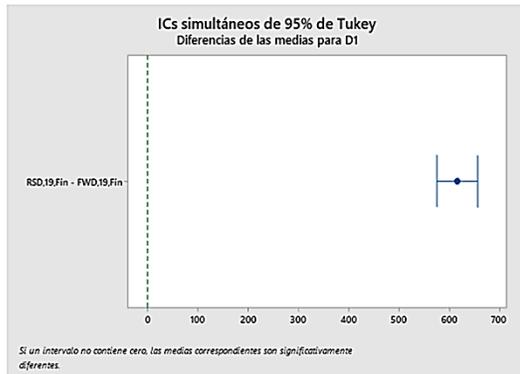


Figura A7.50. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 019 en condiciones finales.

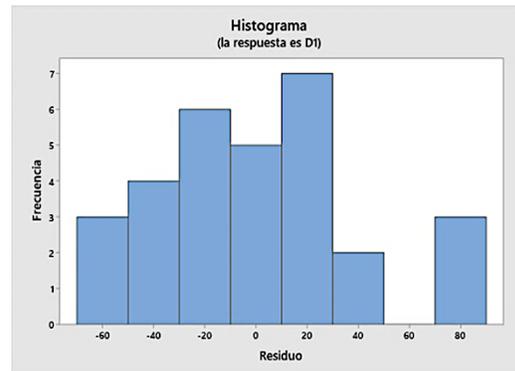
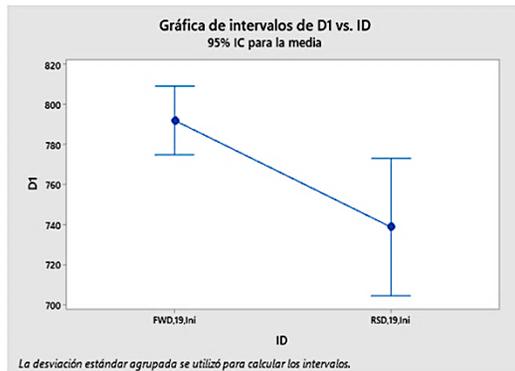


Figura A7.51. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 019 en condiciones iniciales

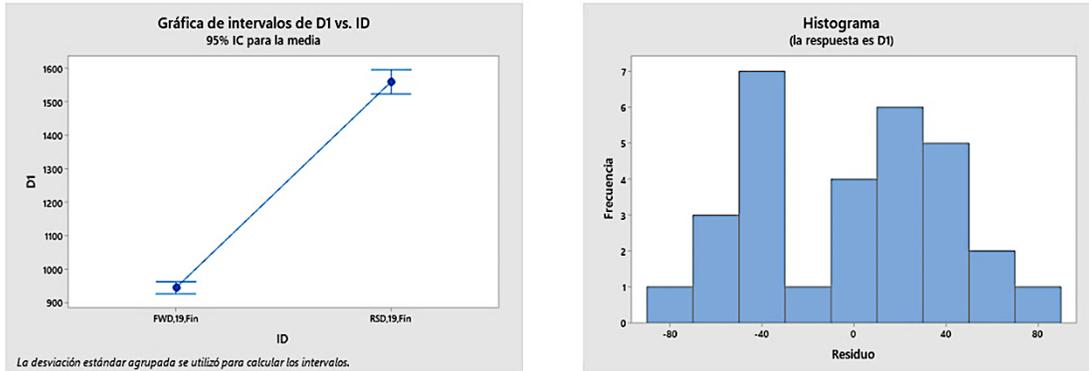


Figura A7.52. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 019 en condiciones finales

Geófono D4

El análisis comparativo para el tramo 019 en condiciones y finales para el geófono D4 se muestra en la **Figura A7.53** y **Figura A7.54**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.55** y **Figura A7.56**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	27	415.73	A
RSD,19,Ini	6	330.50	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	27	415.73	A
RSD,19,Ini	6	330.50	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

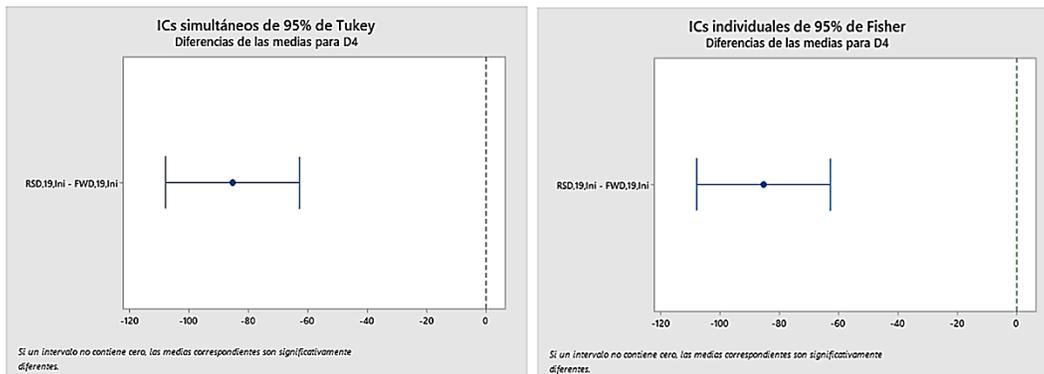


Figura A7.53. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 019 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,19,Fin	6	576.0	A
FWD,19,Fin	24	500.20	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,19,Fin	6	576.0	A
FWD,19,Fin	24	500.20	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

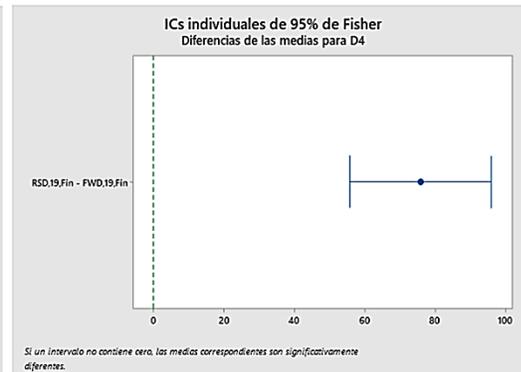
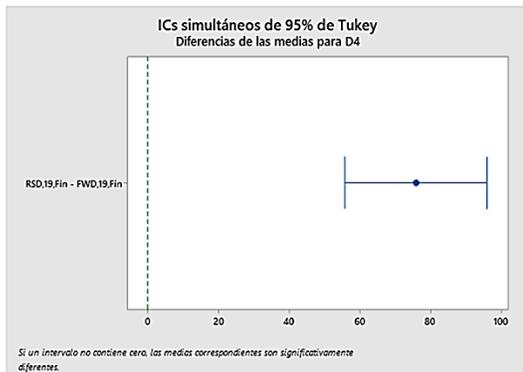


Figura A7.54. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 019 en condiciones finales.

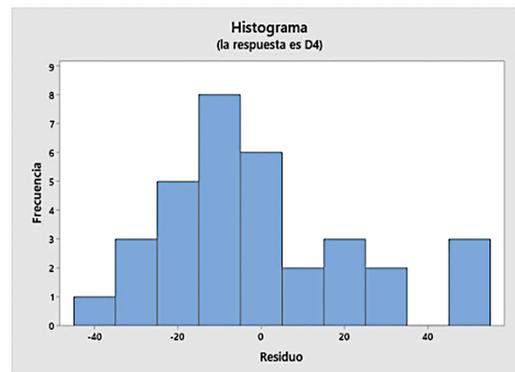
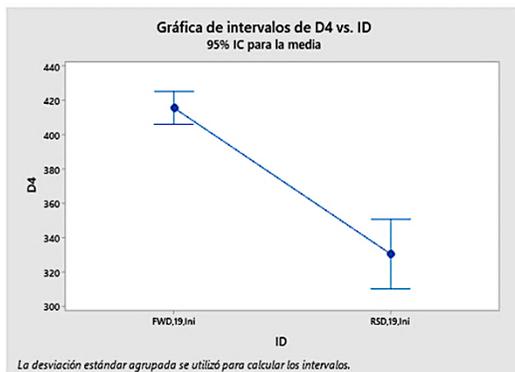


Figura A7.55. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 019 en condiciones iniciales

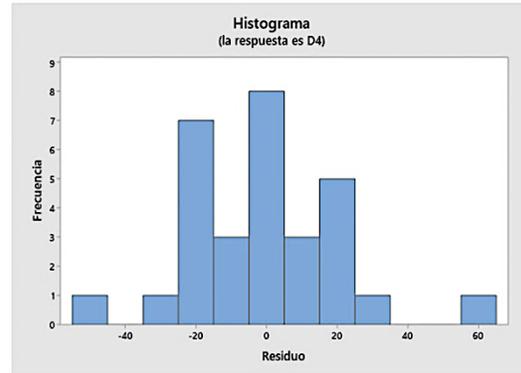
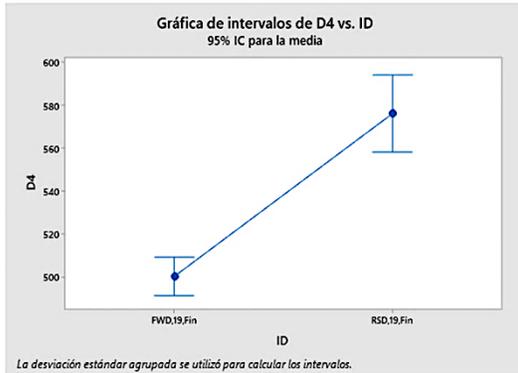


Figura A7.56. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 019 en condiciones finales

Geófono D6

El análisis comparativo para el tramo 019 en condiciones y finales para el geófono D6 se muestra en la **Figura A7.57** y **Figura A7.58**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.59** y **Figura A7.60**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	27	183.14	A
RSD,19,Ini	6	95.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	27	183.14	A
RSD,19,Ini	6	95.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

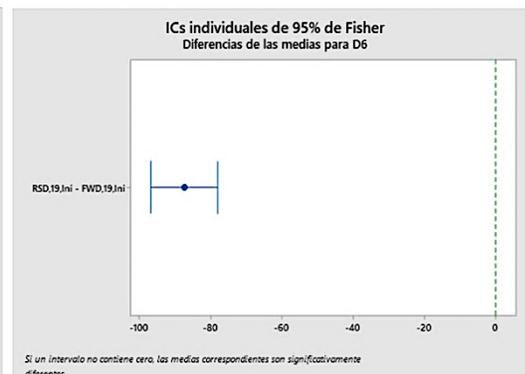
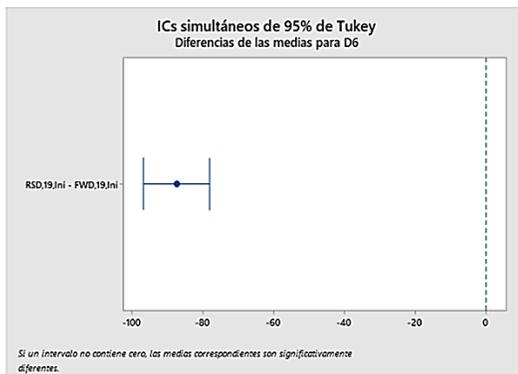


Figura A7.57. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 019 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Fin	24	200.08	A
RSD,19,Fin	6	114.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Fin	24	200.08	A
RSD,19,Fin	6	114.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

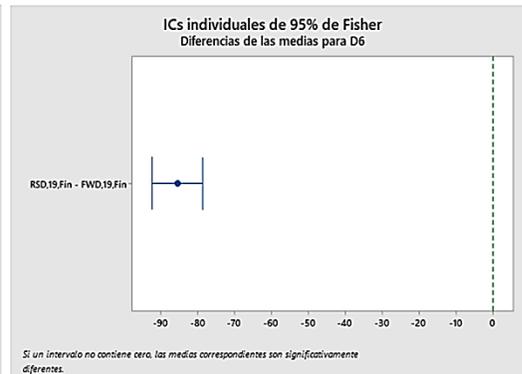
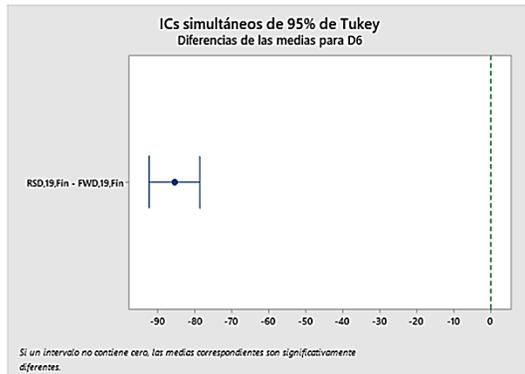


Figura A7.58. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 019 en condiciones finales.

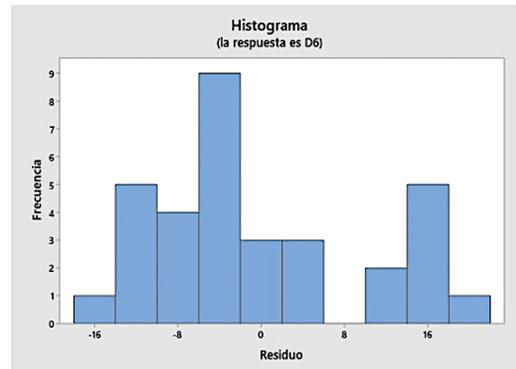
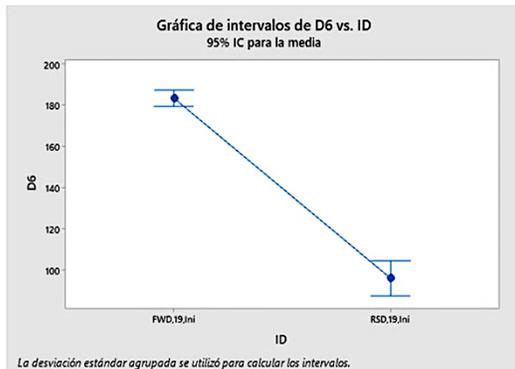


Figura A7.59. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 019 en condiciones iniciales

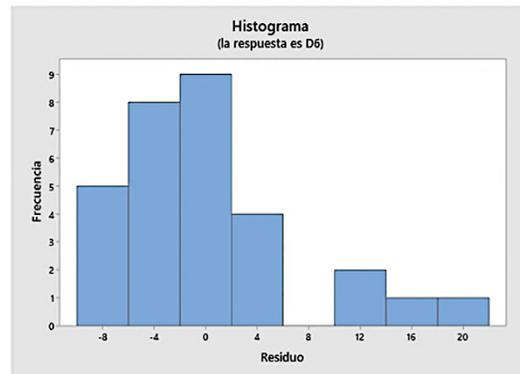
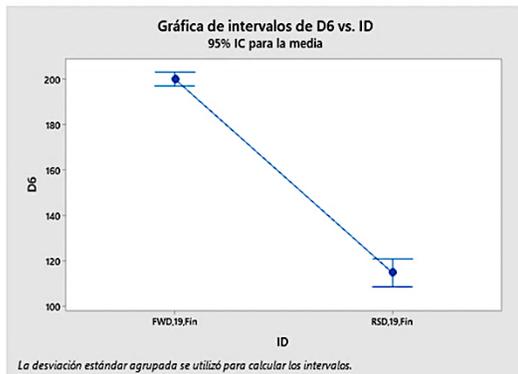


Figura A7.60. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 019 en condiciones finales

Geófono D9

El análisis comparativo para el tramo 019 en condiciones y finales para el geófono D9 se muestra en la **Figura A7.61** y **Figura A7.62**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.63** y **Figura A7.64**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	27	73.94	A
RSD,19,Ini	6	11.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Ini	27	73.94	A
RSD,19,Ini	6	11.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

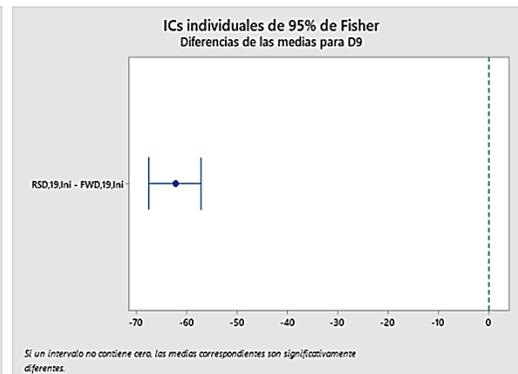
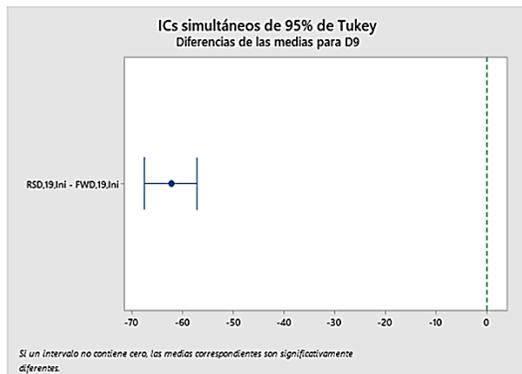


Figura A7.61. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 019 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Fin	24	73.175	A
RSD,19,Fin	6	17.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,19,Fin	24	73.175	A
RSD,19,Fin	6	17.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

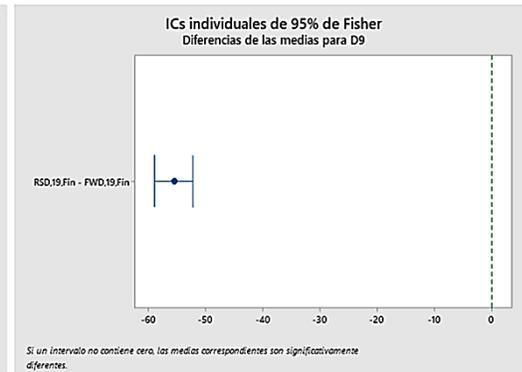
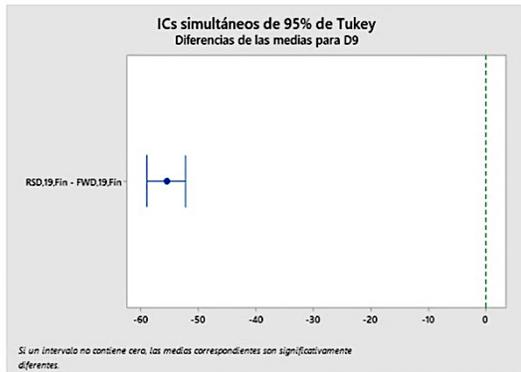


Figura A7.62. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 019 en condiciones finales.

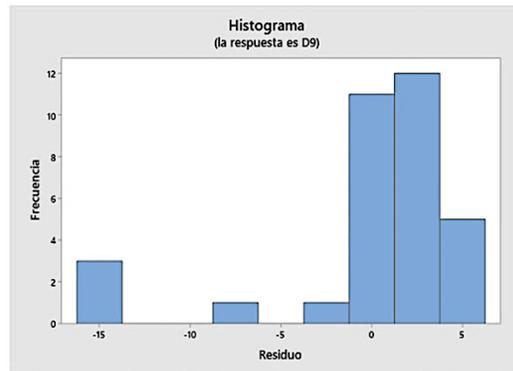
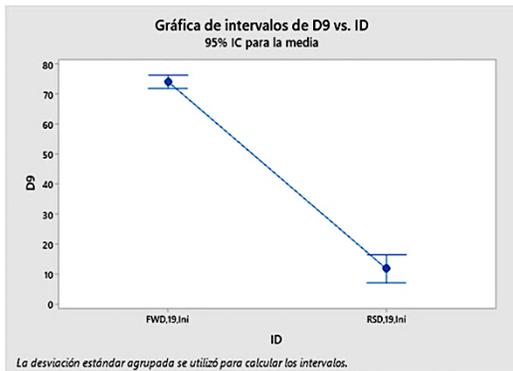


Figura A7.63. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 019 en condiciones iniciales

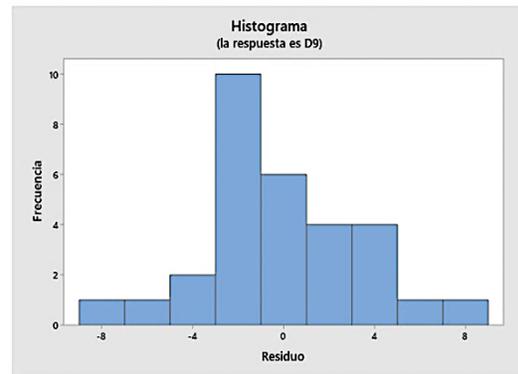
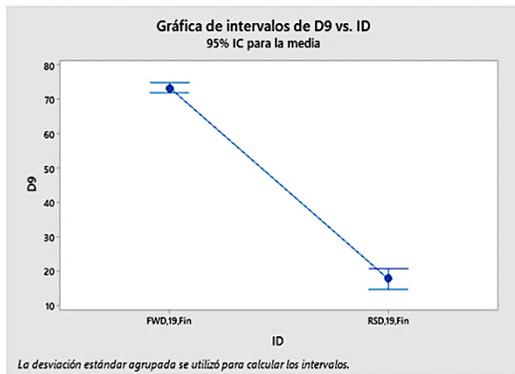


Figura A7.64. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 019 en condiciones finales

Tramo 020

Geófono D1

El análisis comparativo para el tramo 020 en condiciones y finales para el geófono D1 se muestra en la **Figura A7.65** y **Figura A7.66**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.67** y **Figura A7.68**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Ini	27	815.35	A
RSD,20,Ini	6	766.00	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Ini	27	815.35	A
RSD,20,Ini	6	766.00	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

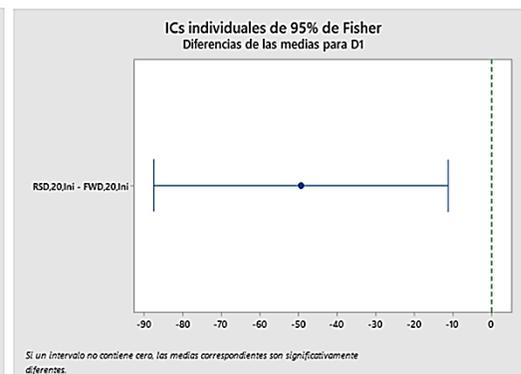
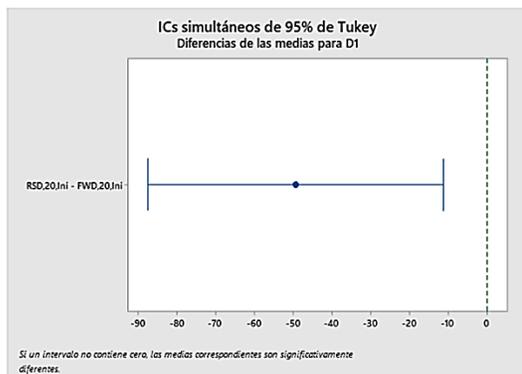


Figura A7.65. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 020 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,20,Fin	6	1498.2	A
FWD,20,Fin	27	920.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,20,Fin	6	1498.2	A
FWD,20,Fin	27	920.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

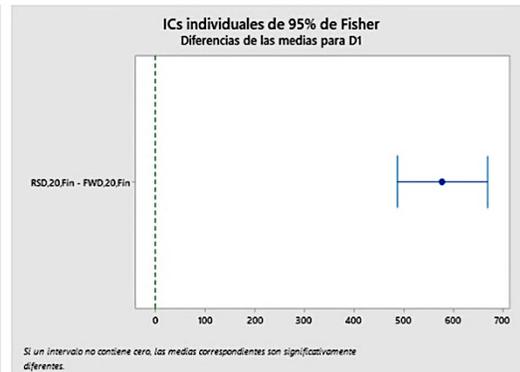
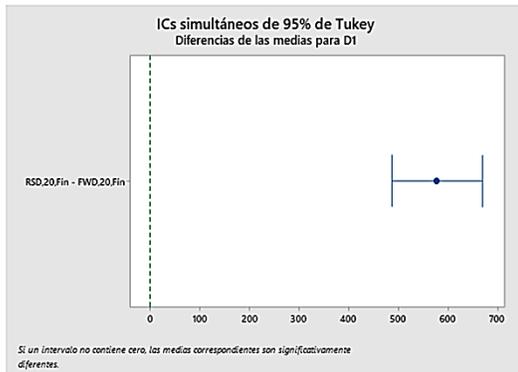


Figura A7.66. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 020 en condiciones finales.

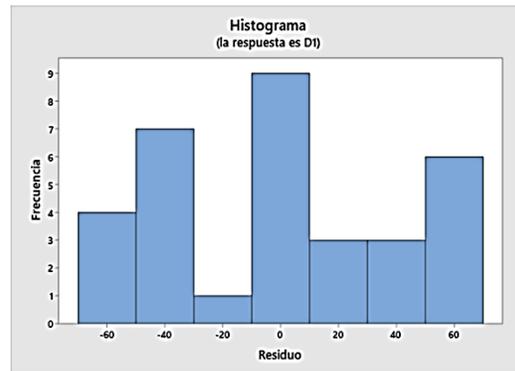
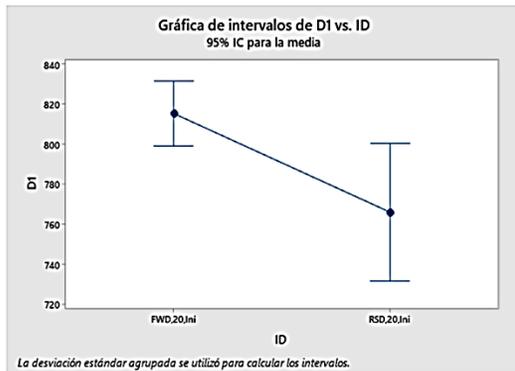


Figura A7.67. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 020 en condiciones iniciales

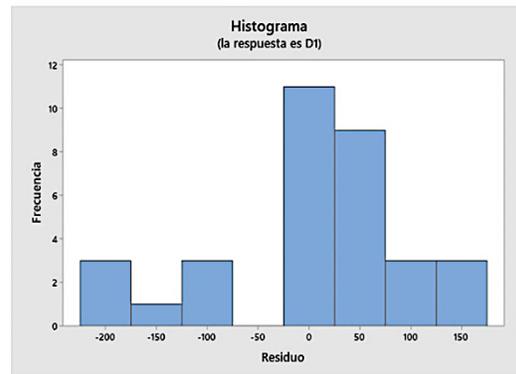
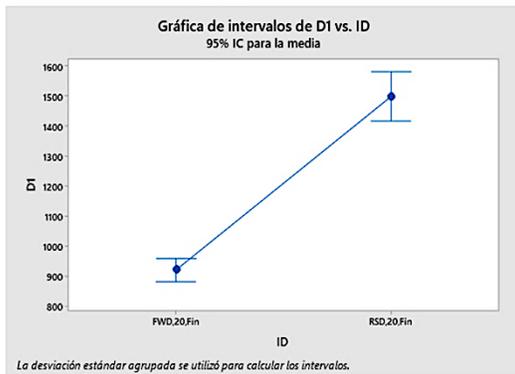


Figura A7.68. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 020 en condiciones finales

Geófono D4

El análisis comparativo para el tramo 020 en condiciones y finales para el geófono D4 se muestra en la **Figura A7.69** y **Figura A7.70**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.71** y **Figura A7.72**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Ini	27	386.23	A
RSD,20,Ini	6	322.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Ini	27	386.23	A
RSD,20,Ini	6	322.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

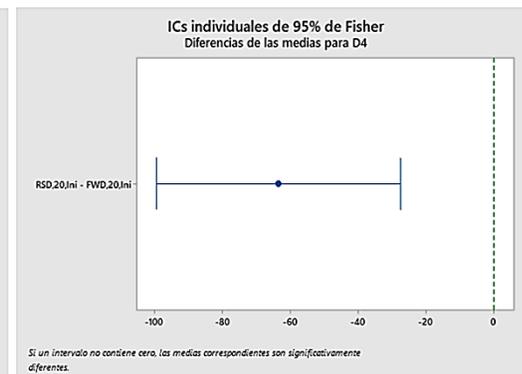
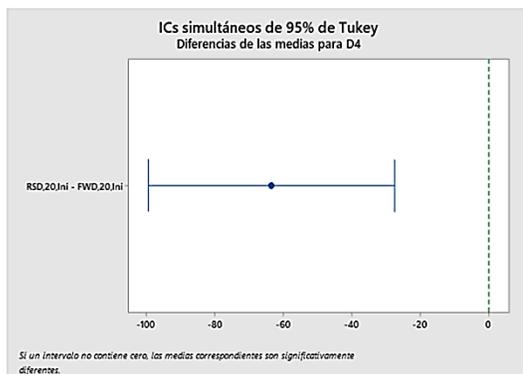


Figura A7.69. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 020 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,20,Fin	6	457.0	A
FWD,20,Fin	27	421.62	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,20,Fin	6	457.0	A
FWD,20,Fin	27	421.62	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

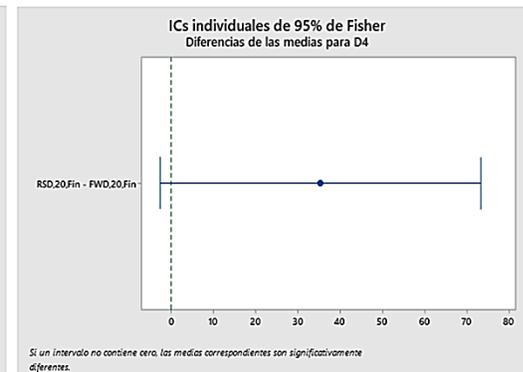
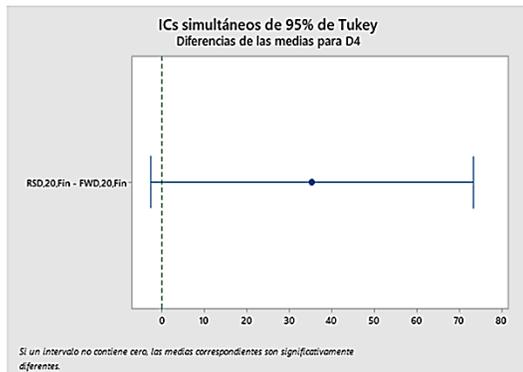


Figura A7.70. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 020 en condiciones finales.

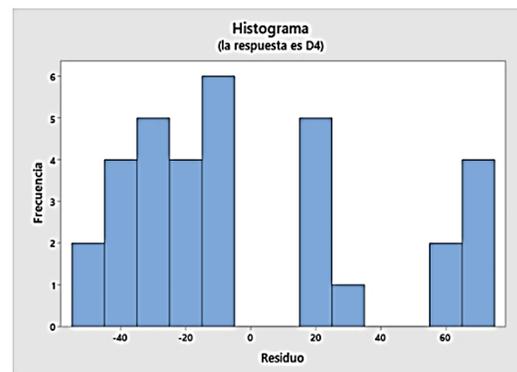
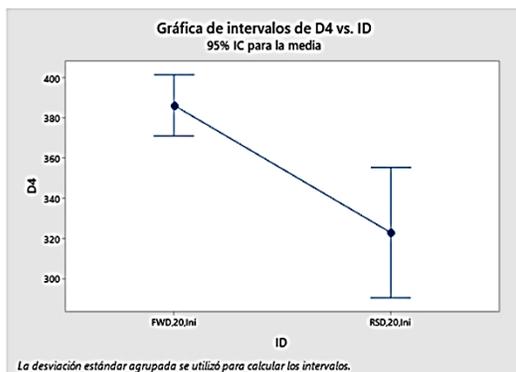


Figura A7.71. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 020 en condiciones iniciales

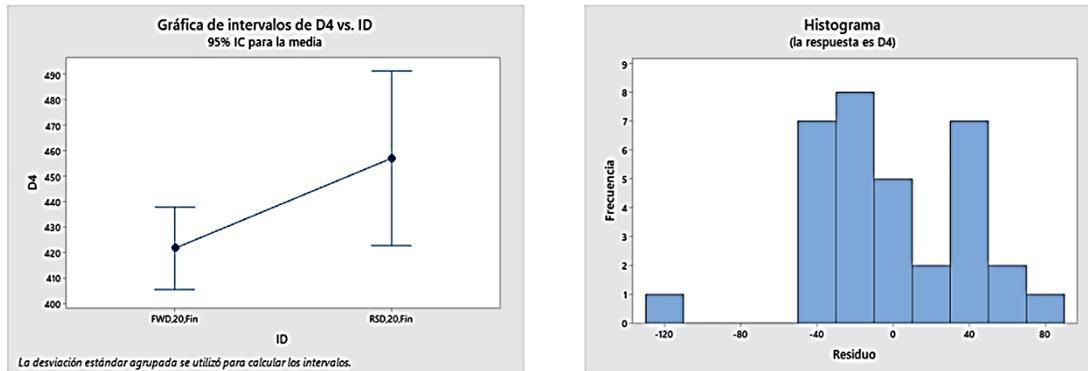


Figura A7.72. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 020 en condiciones finales

Geófono D6

El análisis comparativo para el tramo 020 en condiciones y finales para el geófono D6 se muestra en la **Figura A7.73** y **Figura A7.74**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.75** y **Figura A7.76**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD.20.Ini	27	178.20	A
RSD.20.Ini	6	98.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD.20.Ini	27	178.20	A
RSD.20.Ini	6	98.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

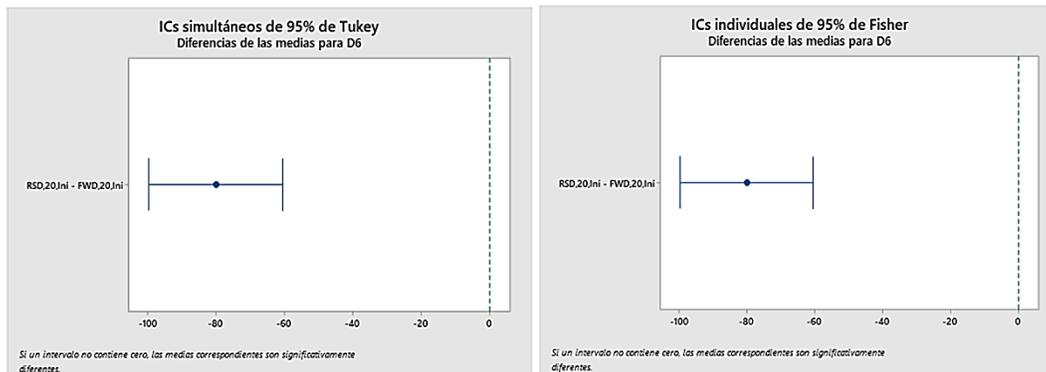


Figura A7.73. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 020 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Fin	27	172.04	A
RSD,20,Fin	6	101.3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Fin	27	172.04	A
RSD,20,Fin	6	101.3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

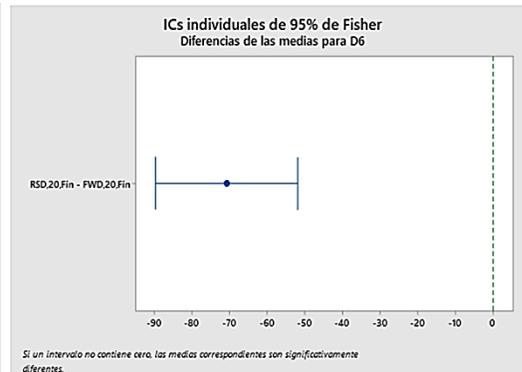
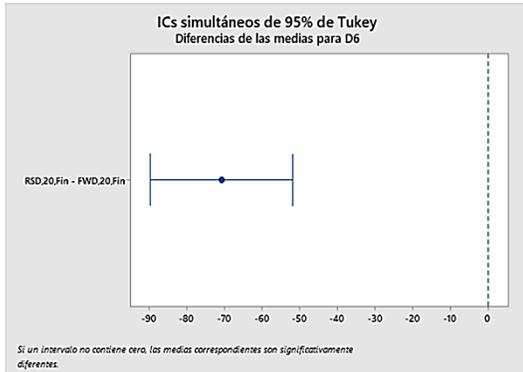


Figura A7.74. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 020 en condiciones finales.

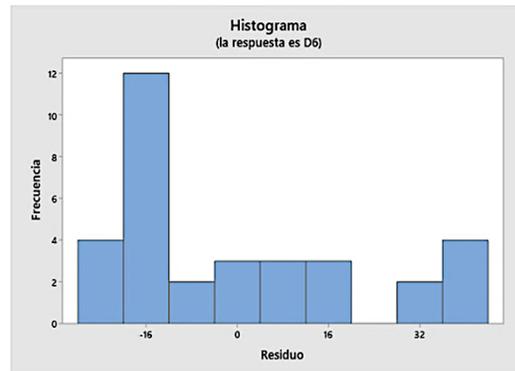
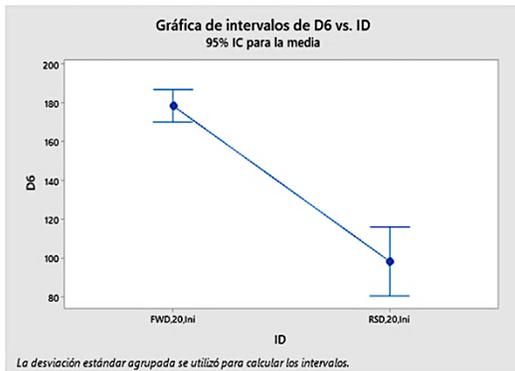


Figura A7.75. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 020 en condiciones iniciales

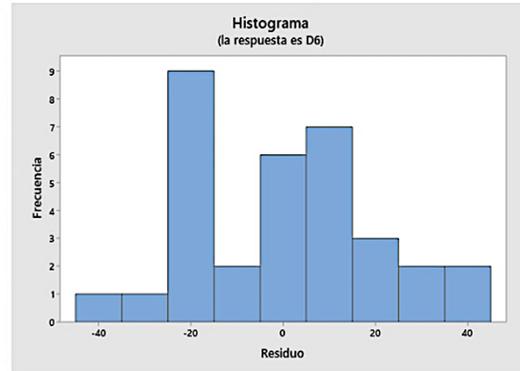
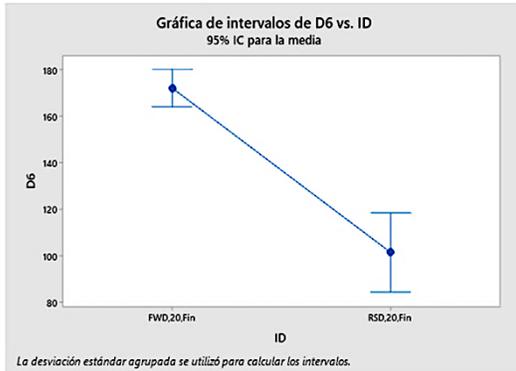


Figura A7.76. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 020 en condiciones finales

Geófono D9

El análisis comparativo para el tramo 019 en condiciones y finales para el geófono D9 se muestra en la **Figura A7.77** y **Figura A7.78**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.79** y **Figura A7.80**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Ini	27	77.13	A
RSD,20,Ini	6	23.33	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Ini	27	77.13	A
RSD,20,Ini	6	23.33	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

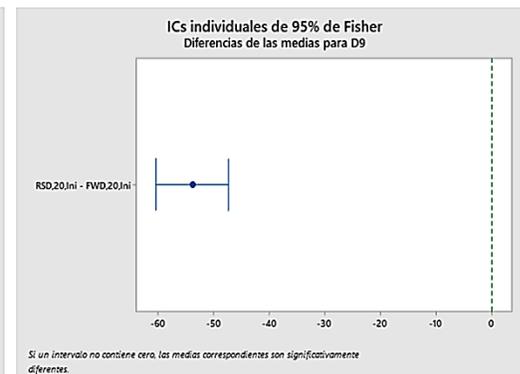
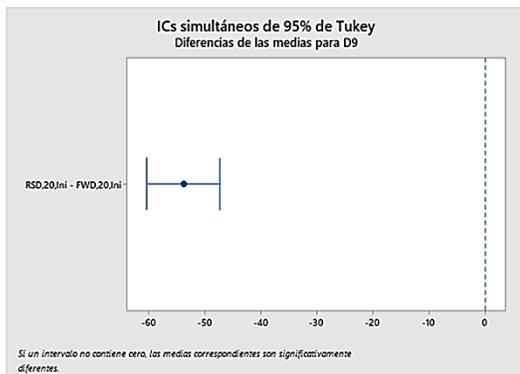


Figura A7.77. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 020 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Fin	27	69.08	A
RSD,20,Fin	6	27.00	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,20,Fin	27	69.08	A
RSD,20,Fin	6	27.00	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

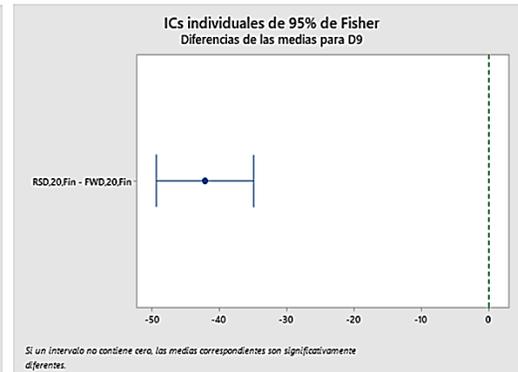
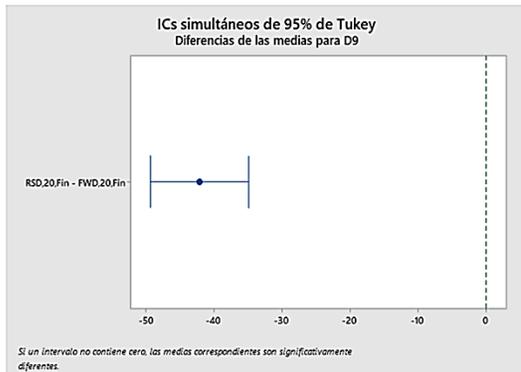


Figura A7.78. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 020 en condiciones finales.

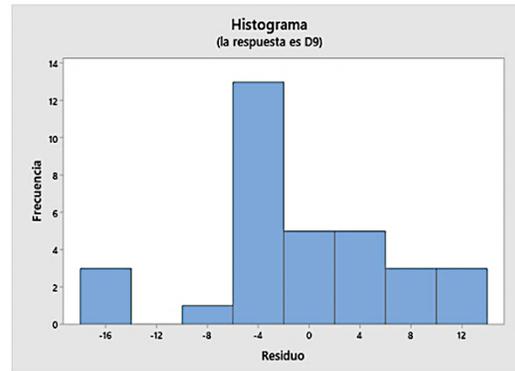
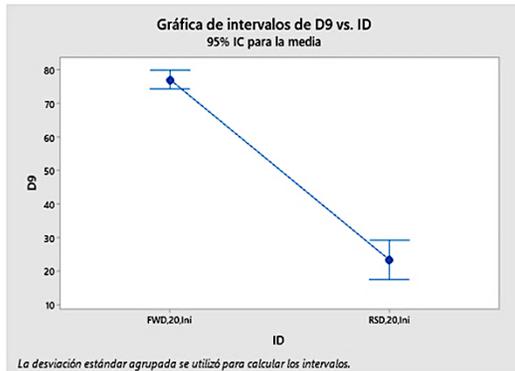


Figura A7.79. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 020 en condiciones iniciales

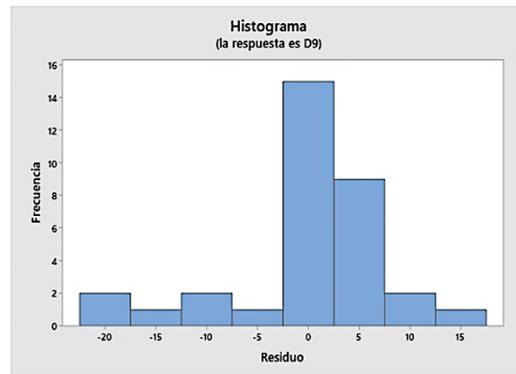
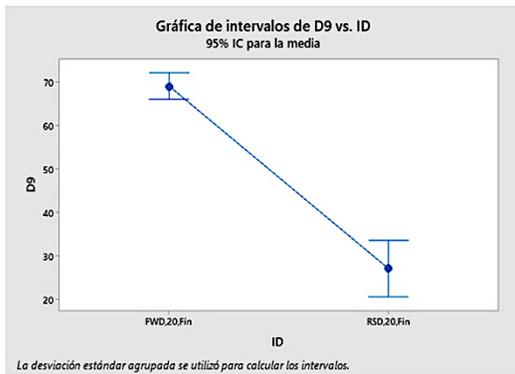


Figura A7.80. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 020 en condiciones finales

Tramo 021

Geófono D1

El análisis comparativo para el tramo 021 en condiciones y finales para el geófono D1 se muestra en la Figura A7.81 y Figura A7.82, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.83 y Figura A7.84.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Ini	27	802.87	A
RSD,21,Ini	6	778.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Ini	27	802.87	A
RSD,21,Ini	6	778.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

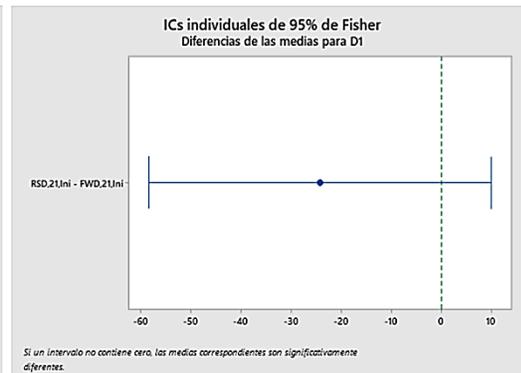
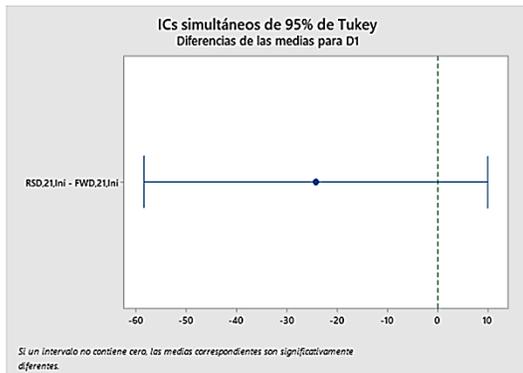


Figura A7.81. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 021 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,21,Fin	6	1502.5	A
FWD,21,Fin	24	893.6	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,21,Fin	6	1502.5	A
FWD,21,Fin	24	893.6	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

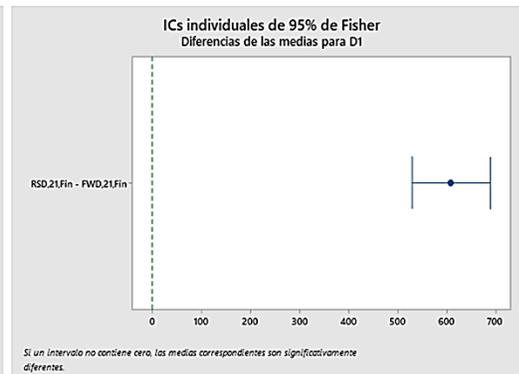
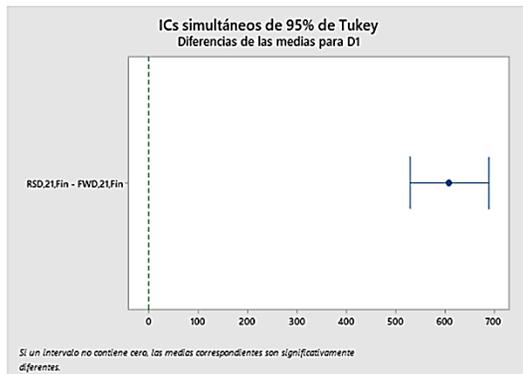


Figura A7.82. ANOVA de deflectometría para D1 de tramo 021 en condiciones finales.

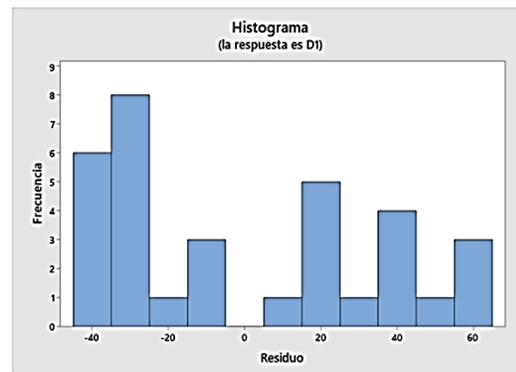
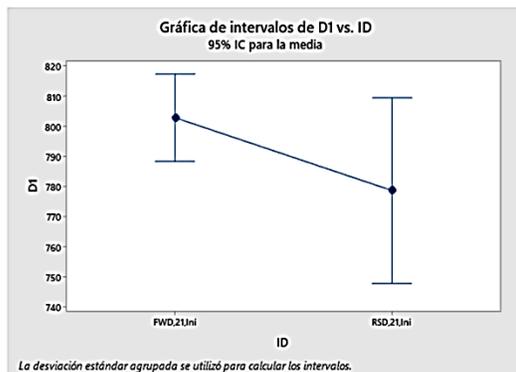


Figura A7.83. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 021 en condiciones iniciales

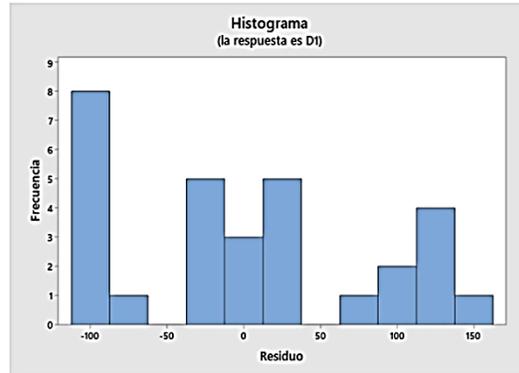
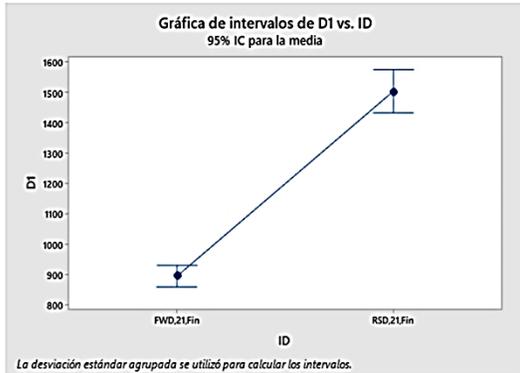


Figura A7.84. Intervalo de medias e histograma de residuales para D1 de tramo 021 en condiciones finales

Geófono D4

El análisis comparativo para el tramo 021 en condiciones y finales para el geófono D4 se muestra en la Figura A7.85 y Figura A7.86, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.87 y Figura A7.88.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD.21,Ini	27	383.51	A
RSD.21,Ini	6	342.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD.21,Ini	27	383.51	A
RSD.21,Ini	6	342.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

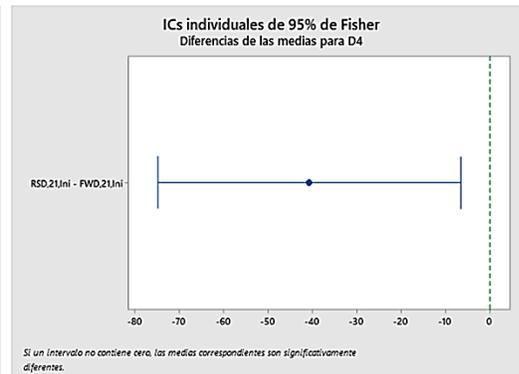
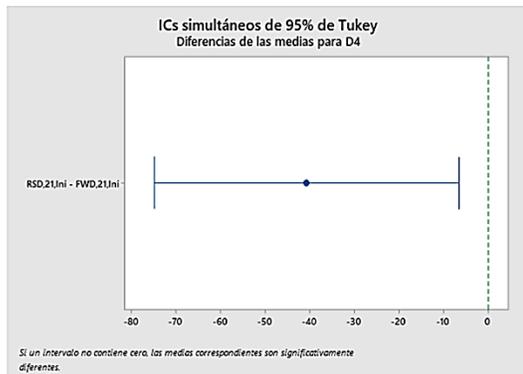


Figura A7.85. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 021 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,21,Fin	6	447.33	A
FWD,21,Fin	24	409.78	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
RSD,20,Fin	6	457.0	A
FWD,20,Fin	27	421.62	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

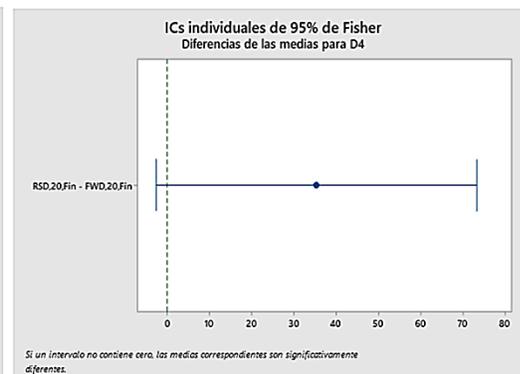
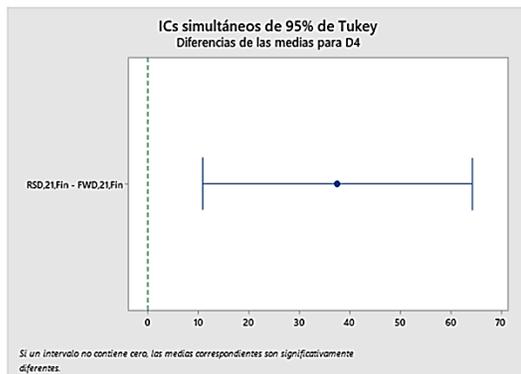


Figura A7.86. ANOVA de deflectometría para D4 de tramo 021 en condiciones finales.

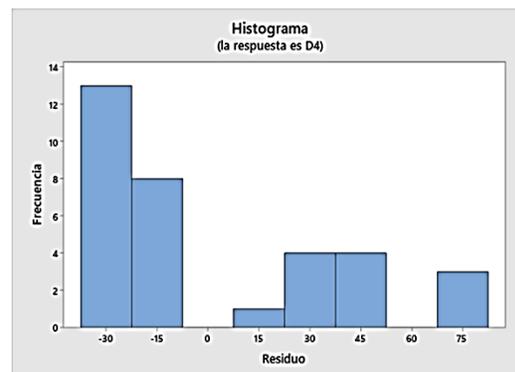
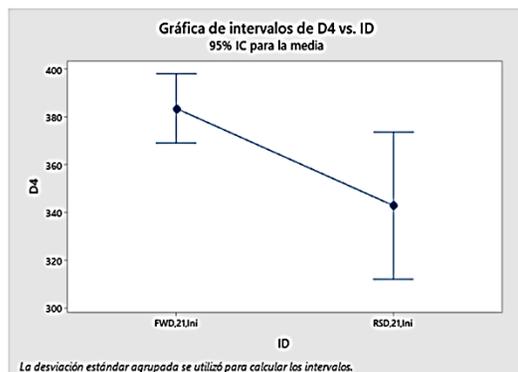


Figura A7.87. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 021 en condiciones iniciales

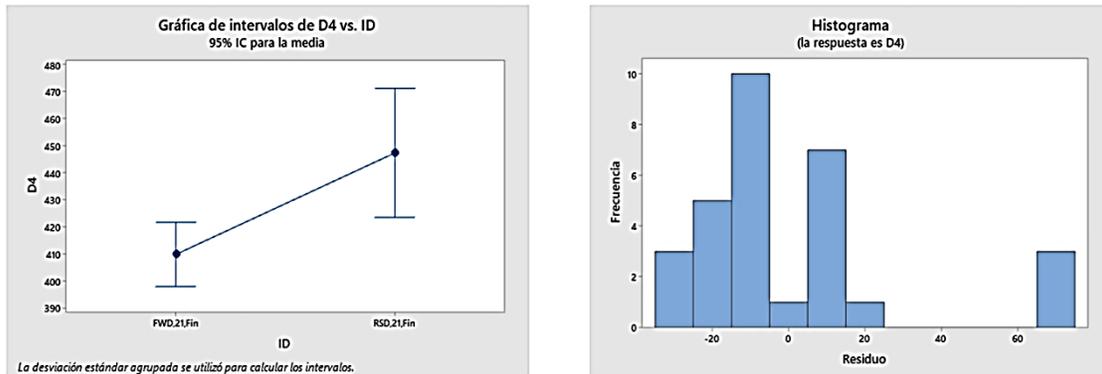


Figura A7.88. Intervalo de medias e histograma de residuales para D4 de tramo 021 en condiciones finales

Geófono D6

El análisis comparativo para el tramo 021 en condiciones y finales para el geófono D6 se muestra en la **Figura A7.89** y **Figura A7.90**, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la **Figura A7.91** y **Figura A7.92**.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Ini	27	176.22	A
RSD,21,Ini	6	101.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Ini	27	176.22	A
RSD,21,Ini	6	101.17	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

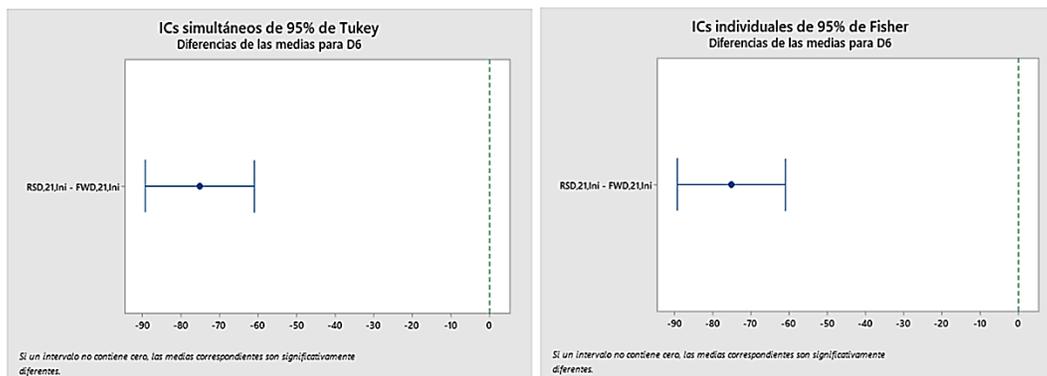


Figura A7.89. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 021 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Fin	24	168.81	A
RSD,21,Fin	6	81.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Fin	24	168.81	A
RSD,21,Fin	6	81.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

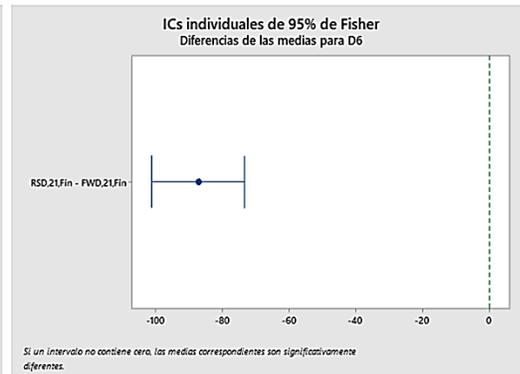
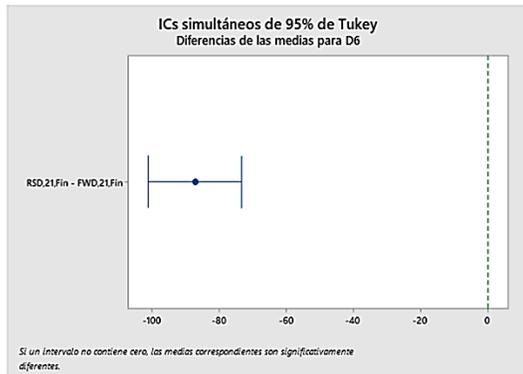


Figura A7.90. ANOVA de deflectometría para D6 de tramo 021 en condiciones finales.

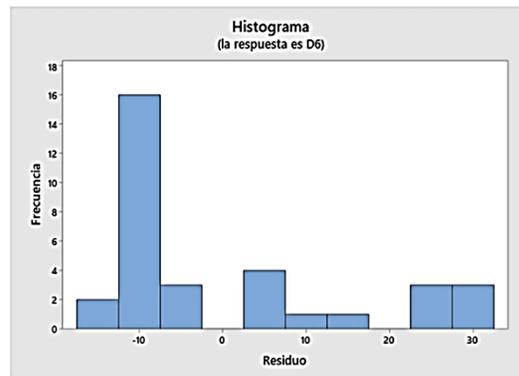
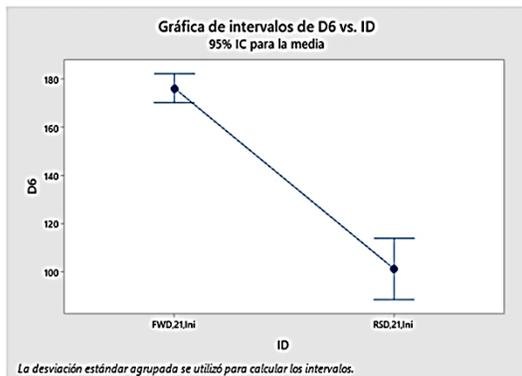


Figura A7.91. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 021 en condiciones iniciales

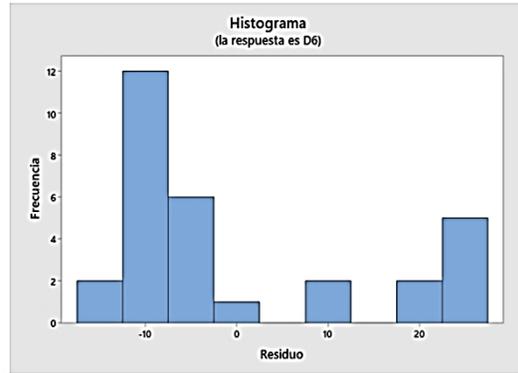
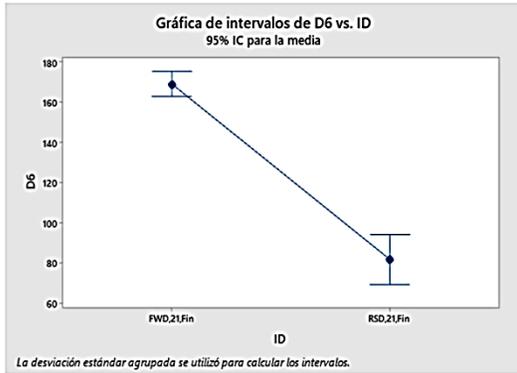


Figura A7.92. Intervalo de medias e histograma de residuales para D6 de tramo 021 en condiciones finales

Geófono D9

El análisis comparativo para el tramo 019 en condiciones y finales para el geófono D9 se muestra en la Figura A7.93 y Figura A7.94, así mismo, el intervalo de medias para cada metodología de deflectometría y el histograma de residuales se muestran en la Figura A7.95 y Figura A7.96.

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Ini	27	74.51	A
RSD,21,Ini	6	24.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Ini	27	74.51	A
RSD,21,Ini	6	24.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

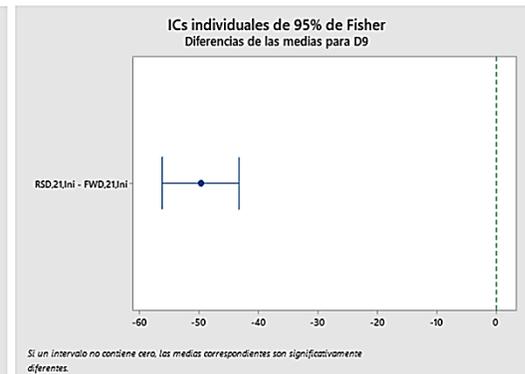
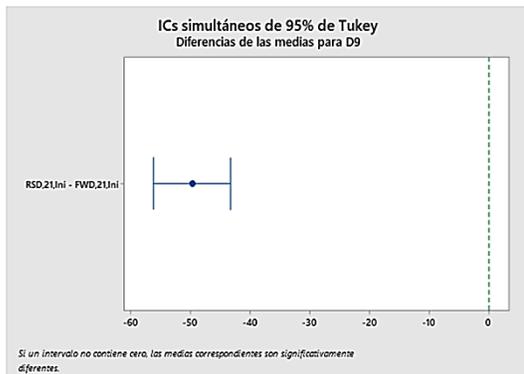


Figura A7.93. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 021 en condiciones iniciales.



Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Fin	24	72.908	A
RSD,21,Fin	6	17.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Comparaciones en parejas de Fisher

Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%

ID	N	Media	Agrupación
FWD,21,Fin	24	72.908	A
RSD,21,Fin	6	17.83	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

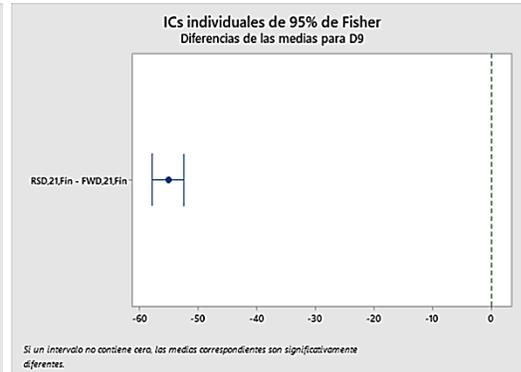
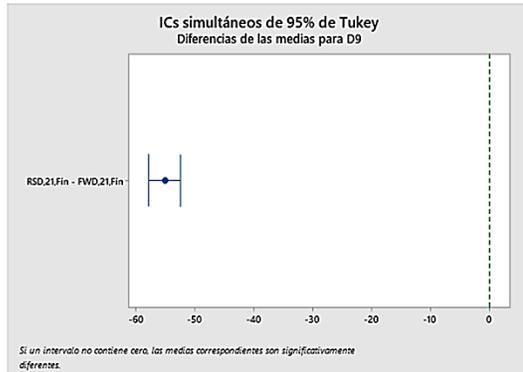


Figura A7.94. ANOVA de deflectometría para D9 de tramo 021 en condiciones finales.

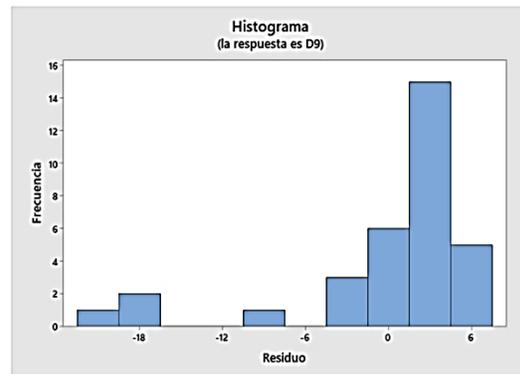
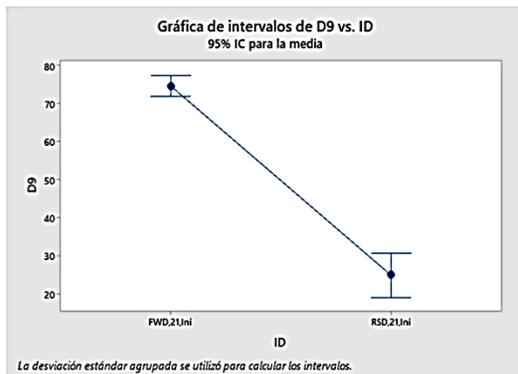


Figura A7.95. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 021 en condiciones iniciales

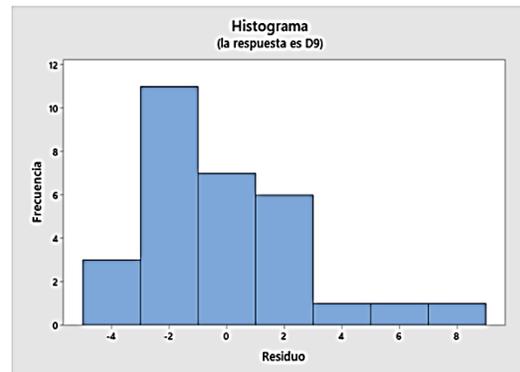
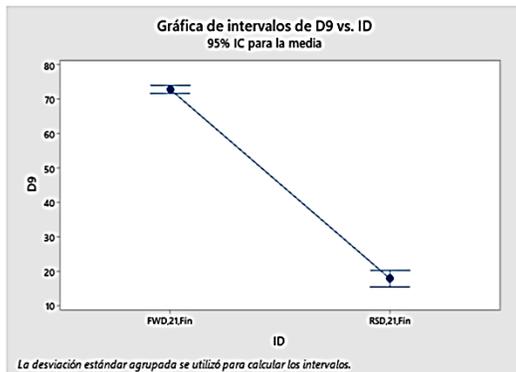


Figura A7.96. Intervalo de medias e histograma de residuales para D9 de tramo 021 en condiciones finales



Anexo 8: Análisis de módulos retrocálculados

Análisis comparativo entre tratamientos (inicial y final) para Módulos promedio

El análisis comparativo de los promedios aritméticos de módulos para cada uno de los tramos estudiados, fueron realizados entre las lecturas de los análisis con datos iniciales (a cero pasadas del HVS) y datos finales (al millón de pasadas del HVS). Los análisis se realizan directamente con los resultados de módulos promedio para cada una de las estaciones por cada tramo, para cada una de las capas constituyentes del pavimento para cada tramo, es decir, a nivel de mezcla asfáltica, base granular, subbase granular y subrasante.

A continuación, se detalla el análisis de varianza por medio de las comparaciones en parejas Tukey para cada uno de los tramos, este análisis se realizó para un mismo tramo, comparando los módulos en cada capa en condiciones inicial y final.

Tramo 015

Para el tramo 015 (mezcla asfáltica de control sin acondicionamiento por temperatura) se realizaron los chequeos de deflectometría en los geófonos D1, D7 y D9, además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los valores de módulo promedio en cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Tabla A8.1. Descripción de deflexiones (D1, D7 y D9) y módulos en cada capa para el tramo 015

Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T15_I	2	829	118	65	3163	104	46	47
T15_I	3	802	110	60	2691	138	42	51
T15_I	4	759	99	60	4111	101	48	42
T15_I	5	771	100	60	3168	104	63	41
T15_I	6	789	101	62	3046	91	76	32
T15_I	7	788	110	65	3166	95	62	49
T15_I	8	788	114	68	3179	87	74	47
T15_F	2	1238	128	74	1166	90	35	43
T15_F	3	1090	120	68	1351	137	25	49

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 286 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T15_F	4	1031	112	65	1700	102	34	52
T15_F	5	1019	108	66	1767	100	34	53
T15_F	6	1089	116	67	1737	71	43	48
T15_F	7	1076	112	66	1043	141	32	50

De igual manera, se realizaron los análisis comparativos Tukey para los resultados de módulos en cada una de las capas y se muestran a continuación en las **Figura A8.1** y **Figura A8.2**.

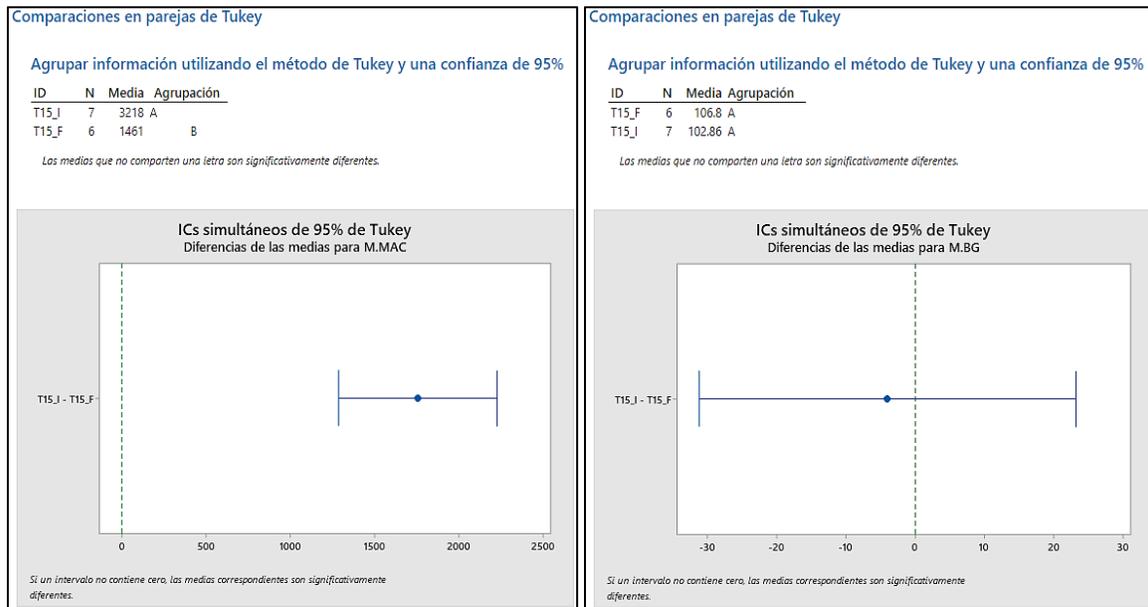


Figura A8.1. ANOVA con análisis Tukey para Mezcla asfáltica y Base granular en tramo 015.

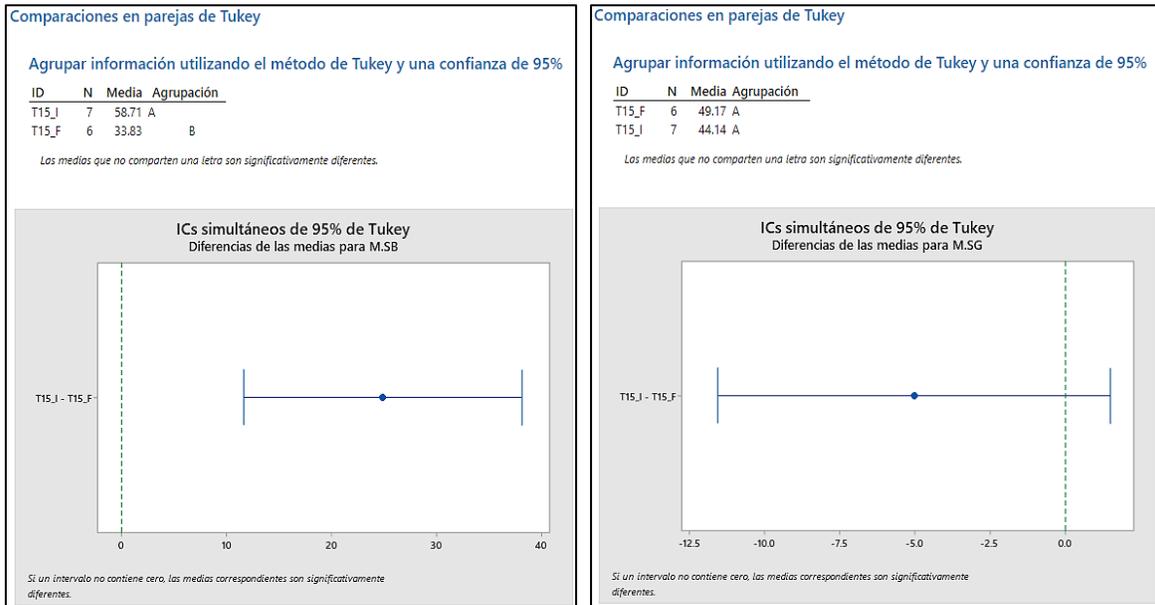


Figura A8.2. ANOVA con análisis Tukey para Subbase granular y Subrasante en tramo 015.

Tramo 016

Para el tramo 016 (mezcla asfáltica con 1.0% de PET sin acondicionamiento por temperatura) se realizaron los chequeos de deflectometría en los geófonos D1, D7 y D9, además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los valores de módulo promedio en cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Tabla A8.2. Descripción de deflexiones (D1, D7 y D9) y módulos en cada capa para el tramo 016

Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T16_I	2	846	128	75	2750	91	67	43
T16_I	3	918	120	73	2413	74	60	48
T16_I	4	942	120	76	2199	60	81	48
T16_I	5	886	116	72	1868	89	79	50
T16_I	6	868	116	70	2121	84	79	52
T16_I	7	833	114	69	2025	89	96	50



Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T16_I	8	803	117	73	2363	85	102	50
T16_F	2	1296	145	82	1790	47	35	43
T16_F	3	1343	132	86	1602	44	34	46
T16_F	4	1179	125	77	1588	53	52	47
T16_F	5	1142	121	71	2185	40	49	49
T16_F	6	1143	110	68	1946	43	67	29
T16_F	7	1045	115	68	1494	73	61	36

De igual manera, se realizaron los análisis comparativos Tukey para los resultados de módulos en cada una de las capas y se muestran a continuación en las **Figura A8.3** y **Figura A8.4**.

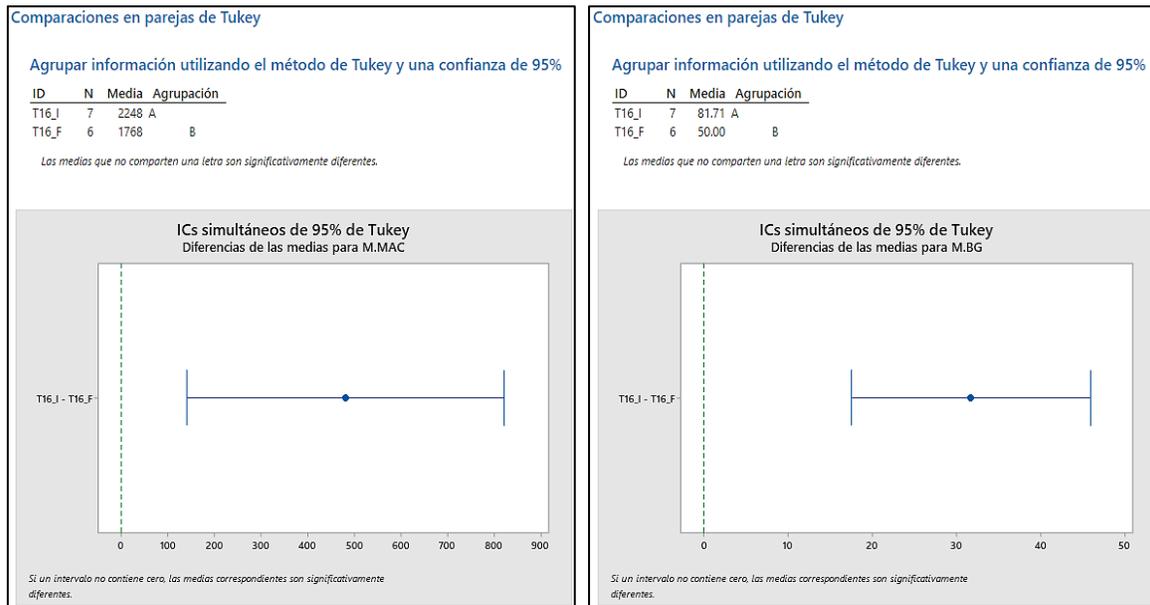


Figura A8.3. ANOVA con análisis Tukey para Mezcla asfáltica y Base granular en tramo 016.

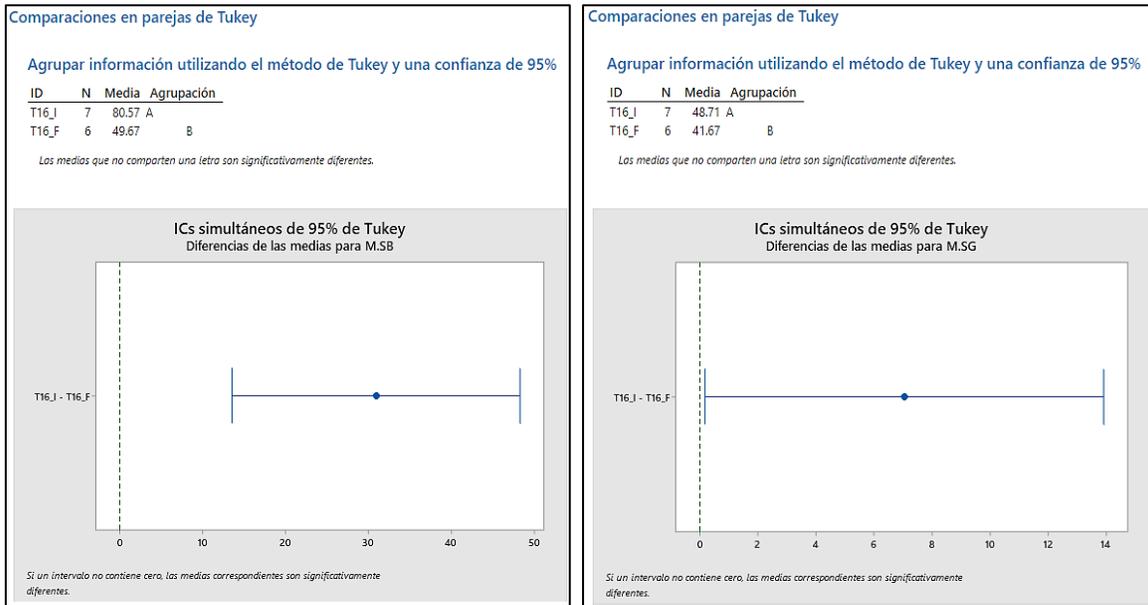


Figura A8.4. ANOVA con análisis Tukey para Subbase granular y Subrasante en tramo 016.

Tramo 017

Para el tramo 017 (mezcla asfáltica con 1.0% de PEAD sin acondicionamiento por temperatura) se realizaron los chequeos de deflectometría en los geófonos D1, D7 y D9, además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los valores de módulo promedio en cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Tabla A8.3. Descripción de deflexiones (D1, D7 y D9) y módulos en cada capa para el tramo 017

Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T17_I	2	766	119	71	2750	120	66	48
T17_I	3	808	114	71	2859	88	66	52
T17_I	4	811	116	73	2475	87	85	50
T17_I	5	823	114	72	1961	98	88	52
T17_I	6	799	112	68	2110	97	94	52
T17_I	7	818	112	70	2024	103	79	52



Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T17_I	8	823	119	73	2179	88	98	48
T17_F	2	1021	112	69	2137	63	54	53
T17_F	3	1087	117	70	1975	58	55	52
T17_F	4	991	100	60	1994	68	65	43
T17_F	5	983	106	69	1995	67	72	50
T17_F	6	993	108	64	1900	76	65	39
T17_F	7	993	113	69	2137	57	71	46

De igual manera, se realizaron los análisis comparativos Tukey para los resultados de módulos en cada una de las capas y se muestran a continuación en las **Figura A8.5** y **Figura A8.6**.

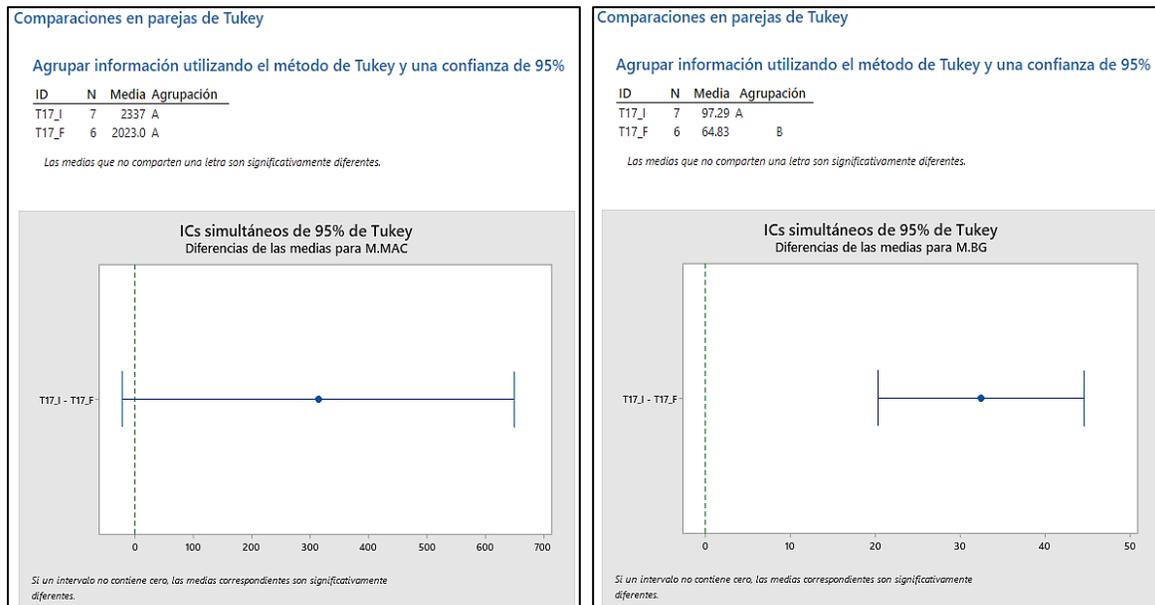


Figura A8.5. ANOVA con análisis Tukey para Mezcla asfáltica y Base granular en tramo 017

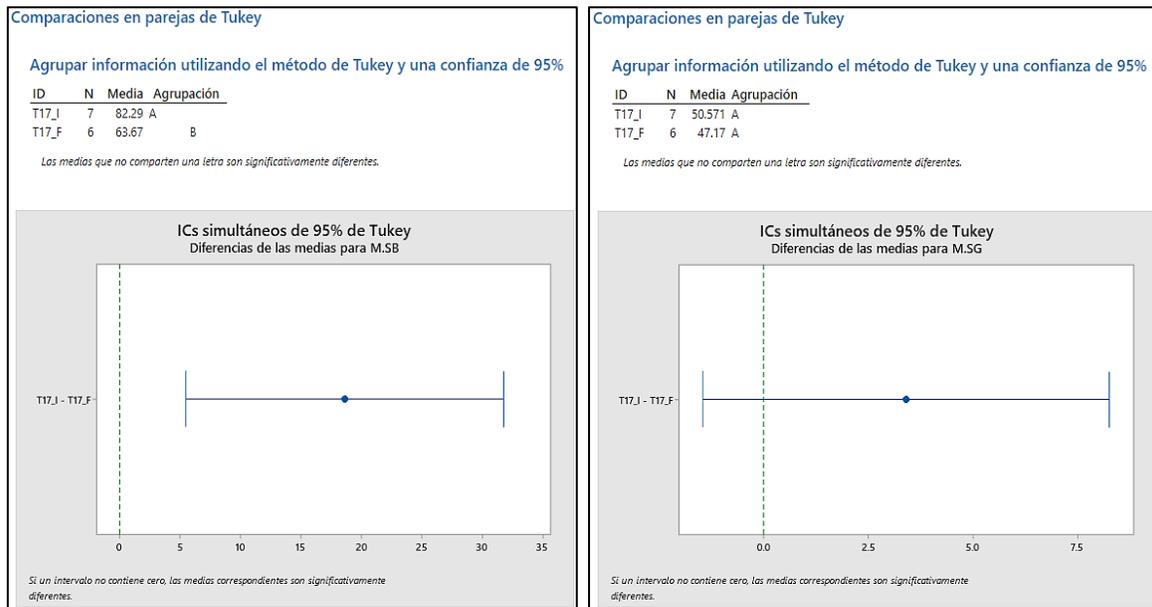


Figura A8.6. ANOVA con análisis Tukey para Subbase granular y Subrasante en tramo 017

Tramo 019

Para el tramo 019 (mezcla asfáltica de control con acondicionamiento por temperatura) se realizaron los chequeos de deflectometría en los geófonos D1, D7 y D9, además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los valores de módulo promedio en cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Tabla A8.4. Descripción de deflexiones (D1, D7 y D9) y módulos en cada capa para el tramo 019

Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T19_I	2	810	125	75	3267	85	68	43
T19_I	3	809	121	75	2807	94	74	45
T19_I	4	747	123	76	2807	126	74	45
T19_I	5	734	124	77	3684	114	65	43
T19_I	6	778	127	76	3157	115	60	44
T19_I	7	785	129	80	2970	119	58	44



Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T19_I	8	778	130	75	4392	83	59	39
T19_I	2	961	118	72	3234	62	32	47
T19_F	3	1016	126	76	3075	80	39	46
T19_F	4	908	123	71	3582	82	35	47
T19_F	5	869	123	65	4119	64	33	45
T19_F	6	946	123	77	3513	60	41	44
T19_F	7	949	140	82	3234	73	39	42

De igual manera, se realizaron los análisis comparativos Tukey para los resultados de módulos en cada una de las capas y se muestran a continuación en las **Figura A8.7** y **Figura A8.8**.

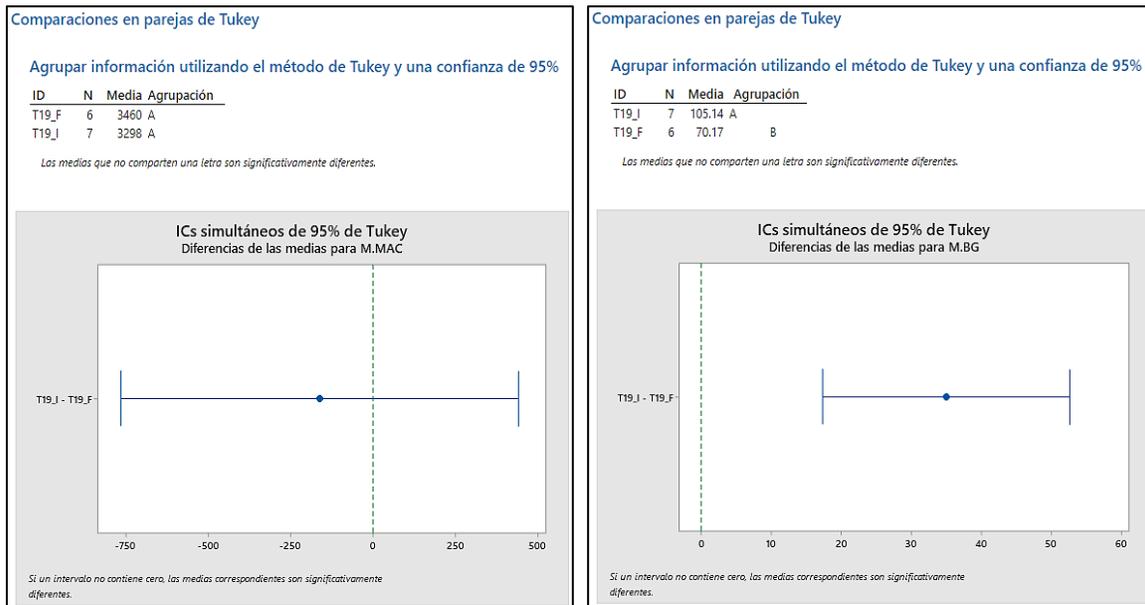


Figura A8.7. ANOVA con análisis Tukey para Mezcla asfáltica y Base granular en tramo 019

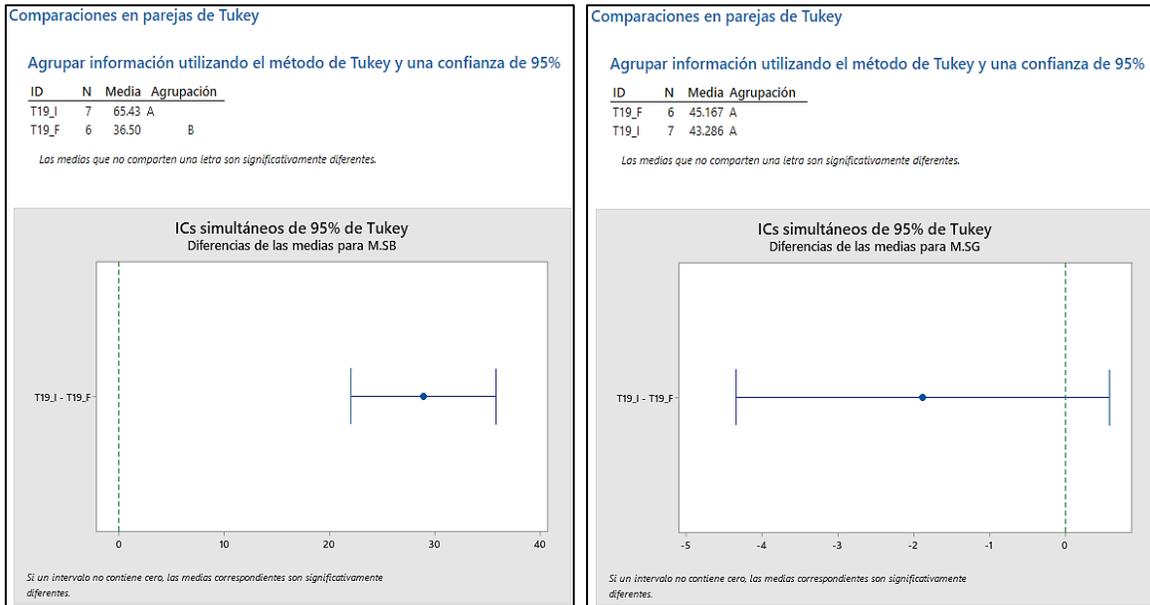


Figura A8.8. ANOVA con análisis Tukey para Subbase granular y Subrasante en tramo 019

Tramo 020

Para el tramo 020 (mezcla asfáltica de control con 1.0% de PET con acondicionamiento por temperatura) se realizaron los chequeos de deflectometría en los geófonos D1, D7 y D9, además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los valores de módulo promedio en cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Tabla A8.5. Descripción de deflexiones (D1, D7 y D9) y módulos en cada capa para el tramo 020

Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T20_I	2	821	124	75	1944	108	89	48
T20_I	3	778	117	72	2071	100	102	50
T20_I	4	779	119	75	2106	108	95	50
T20_I	5	752	123	79	2268	125	93	47
T20_I	6	766	132	83	3049	88	101	42
T20_I	7	836	140	86	2774	83	85	40



Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T20_I	8	881	154	90	2744	93	70	36
T20_F	2	990	110	68	1766	61	85	55
T20_F	3	951	112	69	2196	58	71	53
T20_F	4	920	114	69	2351	69	74	47
T20_F	5	899	117	74	2369	80	63	47
T20_F	6	933	121	74	2959	61	56	48
T20_F	7	1006	123	76	2244	63	54	47
T20_F	8	1060	143	78	2244	50	71	39

De igual manera, se realizaron los análisis comparativos Tukey para los resultados de módulos en cada una de las capas y se muestran a continuación en las **Figura A8.9** y **Figura A8.10**.

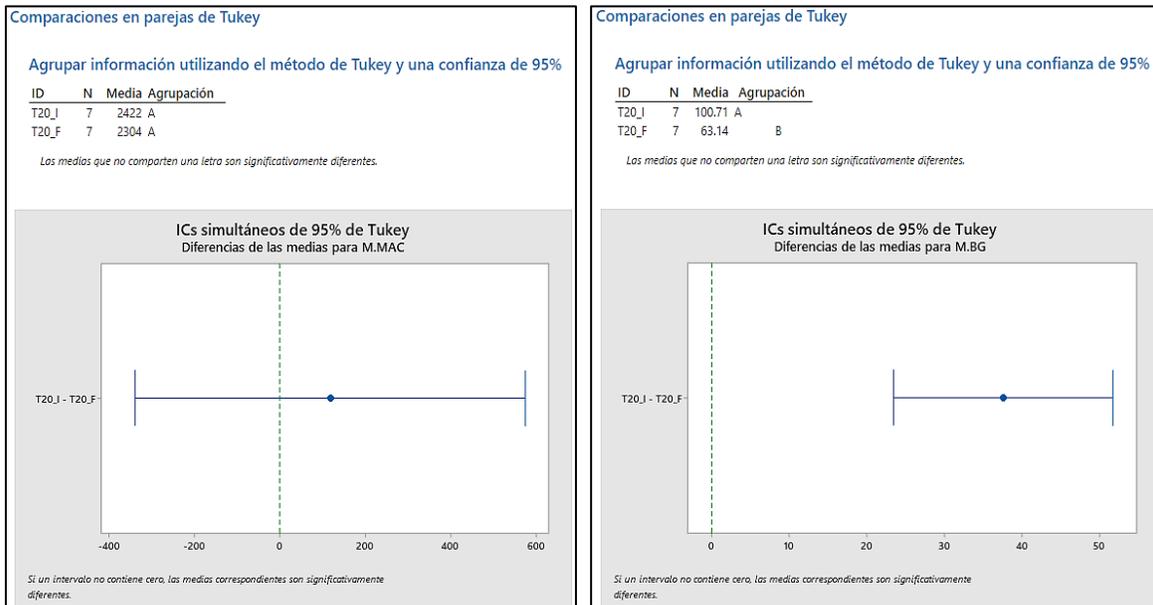


Figura A8.9. ANOVA con análisis Tukey para Mezcla asfáltica y Base granular en tramo 020

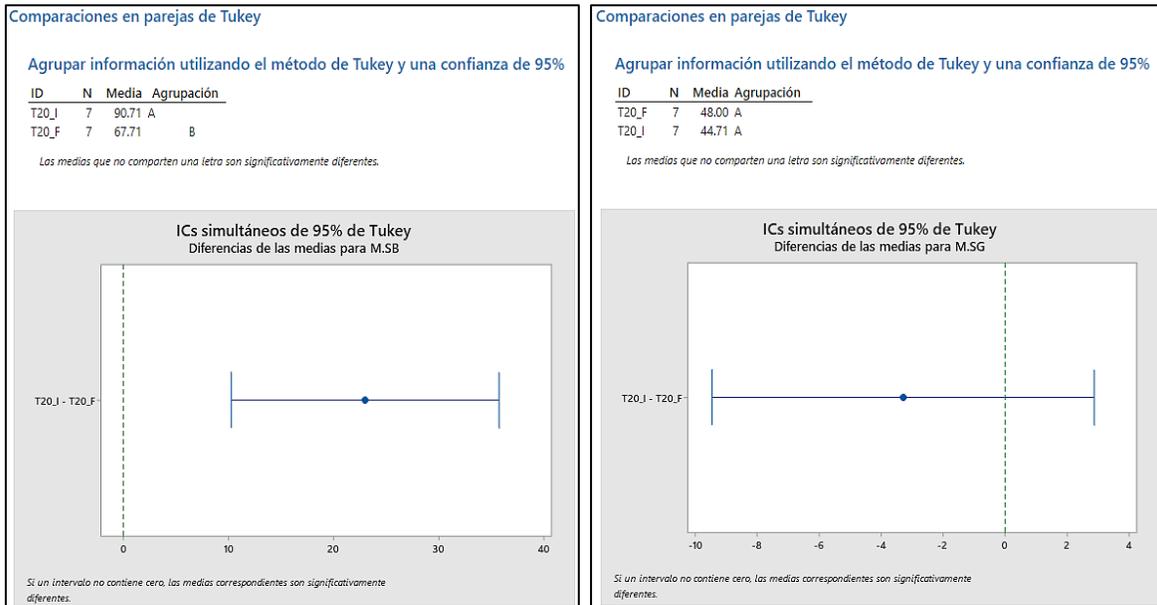


Figura A8.10. ANOVA con análisis Tukey para Subbase granular y Subrasante en tramo 020

Tramo 021

Para el tramo 021 (mezcla asfáltica de control con 1.0% de PET con acondicionamiento por temperatura) se realizaron los chequeos de deflectometría en los geófonos D1, D7 y D9, además, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para los valores de módulo promedio en cada una de las capas de la estructura de pavimento.

Tabla A8.6. Descripción de deflexiones (D1, D7 y D9) y módulos en cada capa para el tramo 021

Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T21_I	2	774	125	77	2428	101	95	46
T21_I	3	776	124	77	2506	102	89	47
T21_I	4	770	123	78	2499	88	116	46
T21_I	5	758	122	75	2457	100	108	46
T21_I	6	788	127	75	2905	73	106	46
T21_I	7	837	129	78	2581	98	65	45



Tratamiento	Estación	D1	D7	D9	Módulo MAC	Módulo BG	Módulo SB	Módulo SR
T21_I	8	818	143	81	3040	97	74	38
T21_F	2	861	118	74	2517	70	79	49
T21_F	3	869	117	73	2936	46	94	50
T21_F	4	886	112	72	2644	53	83	51
T21_F	5	900	110	69	2701	58	63	54
T21_F	6	985	117	71	2216	55	68	51
T21_F	7	1010	132	76	2285	66	53	43

De igual manera, se realizaron los análisis comparativos Tukey para los resultados de módulos en cada una de las capas y se muestran a continuación en las **Figura A8.11** y **Figura A8.12**.

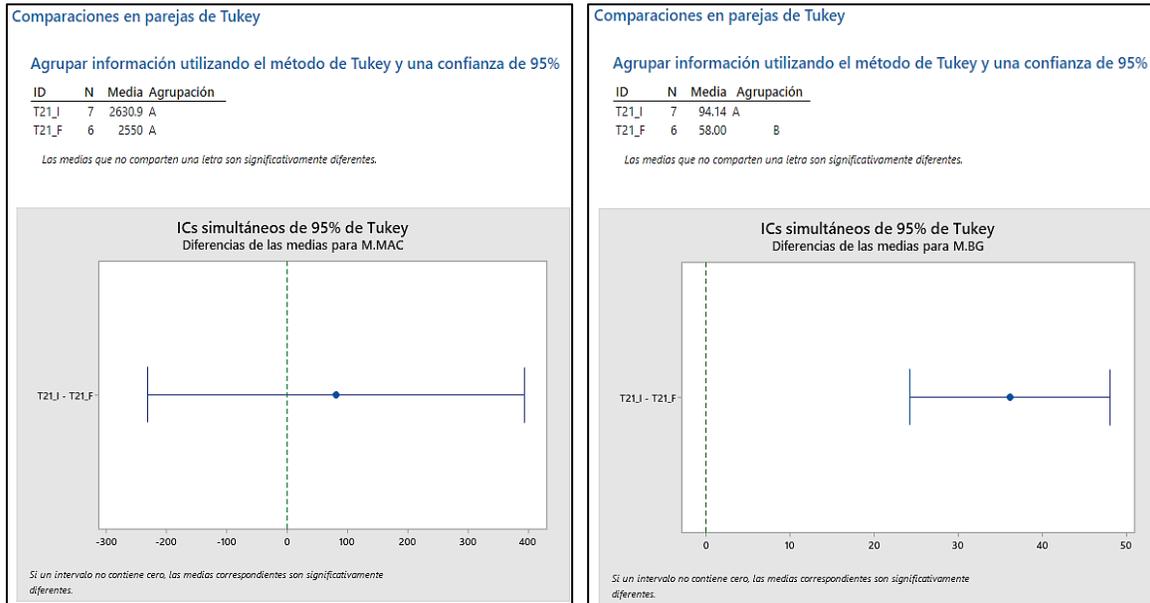


Figura A8.11. ANOVA con análisis Tukey para Mezcla asfáltica y Base granular en tramo 021

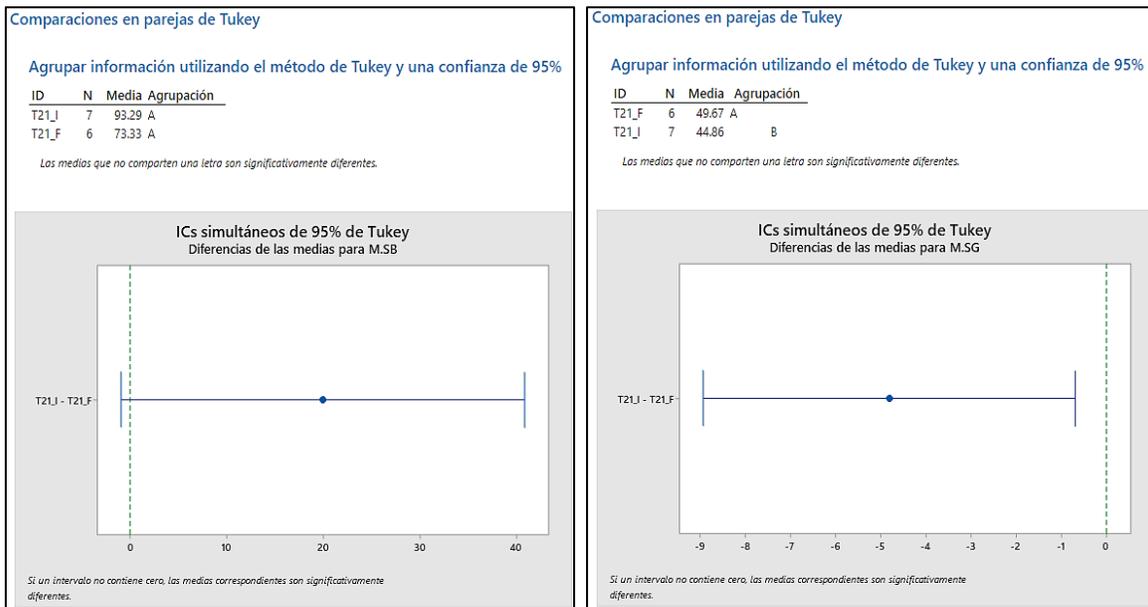


Figura A8.12. ANOVA con análisis Tukey para Subbase granular y Subrasante en tramo 021

Posterior al análisis para cada tramo, se realizó un análisis general tomando en cuenta todos los tramos estudiados dentro del proyecto. Dentro del ANOVA final, se incluyeron todos los tramos con los valores de módulo promedio (promedio aritmético) en condición inicial (cero pasadas del HVS) y final (después de 1 millón de pasadas del HVS). En la **Figura A8.13** se muestra el resultado del análisis de comparación en parejas Tukey para todos los tramos del HVS, además en la **Figura A8.14** se muestra el análisis de distribución de grupo por medias basado en la desviación estándar agrupada.

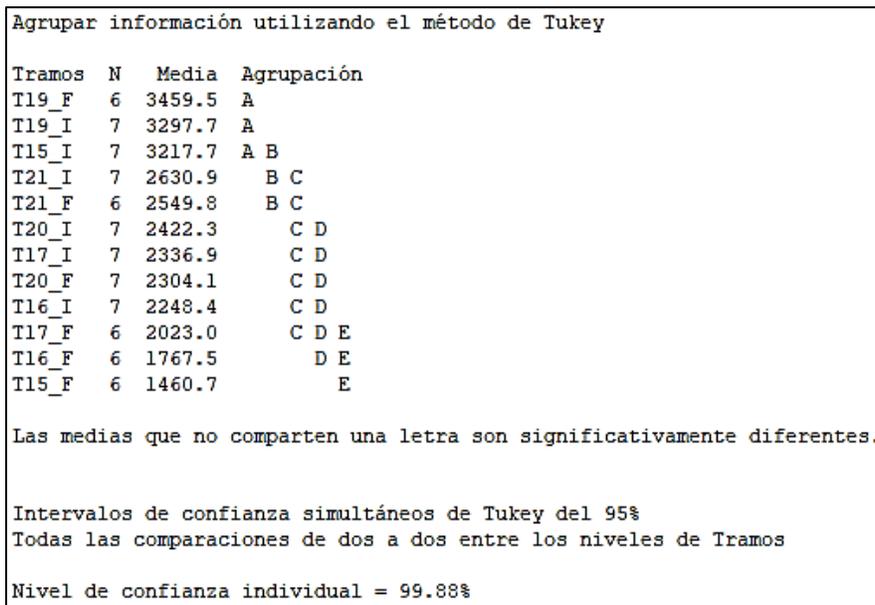


Figura A8.13. ANOVA con análisis Tukey para todos los tramos HVS en base a valores de módulo promedio

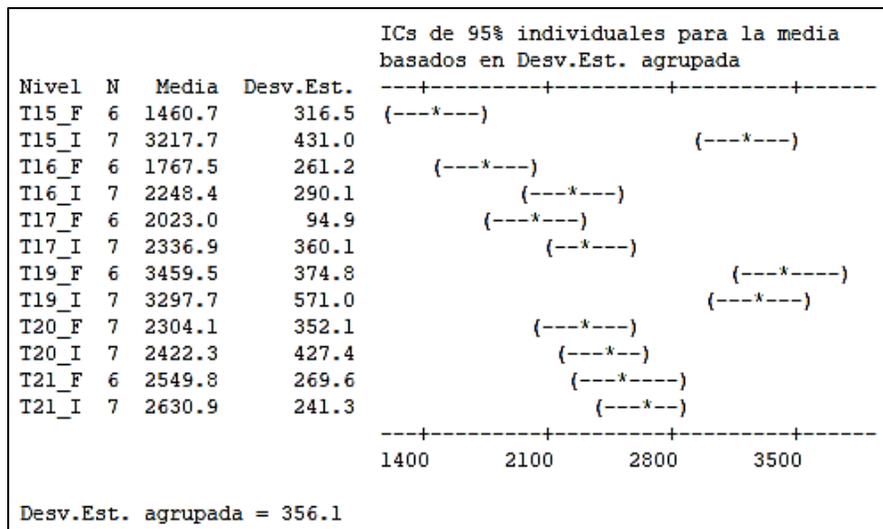


Figura A8.14. Análisis de grupo por medias en base a la desviación estándar agrupada.

Como resultado final se incluyen los resultados del ANOVA realizado sobre los datos de módulos promedio para cada uno de los tramos. Dentro de los resultados, en la **Figura A8.15** se muestra el gráfico de la distribución de valores para cada uno de los tramos, en

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 299 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



la **Figura A8.16** el gráfico de análisis de caja cajas, en la **Figura A8.17** se muestra el histograma de residuales, en la **Figura A8.18** se muestra la prueba de normalidad realizada sobre los datos, en la **Figura A8.19** se muestra la distribución de los valores ajustados vs residuales y en la **Figura A8.20** se muestra la distribución de residuales según orden de observación.

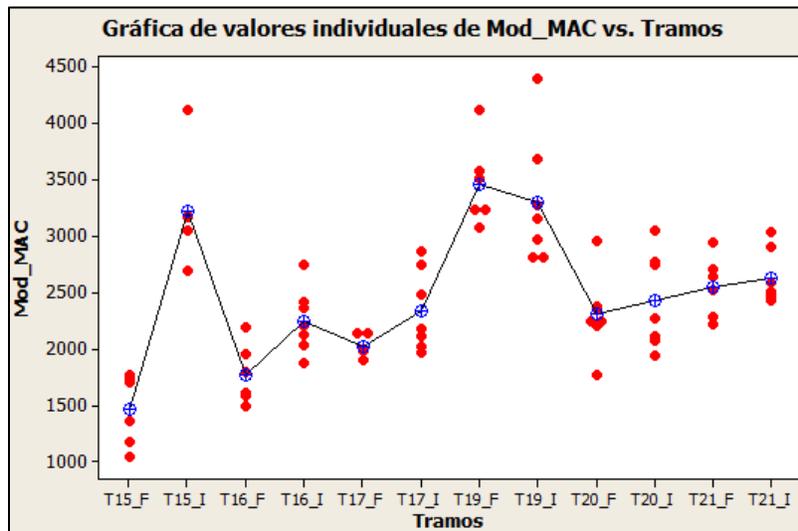


Figura A8.15. Distribución de valores individuales para los datos de módulo analizados

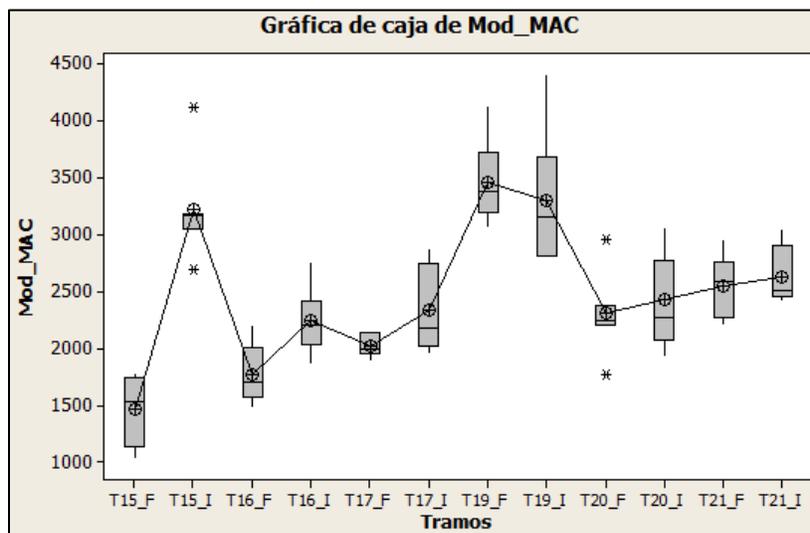


Figura A8.16. Gráfico de cajas para los valores de módulo analizados

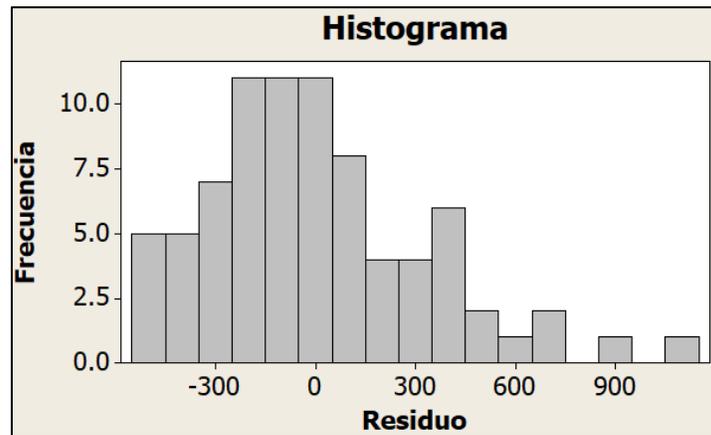


Figura A8.17. Histograma de residuales para ANOVA de valores de módulo

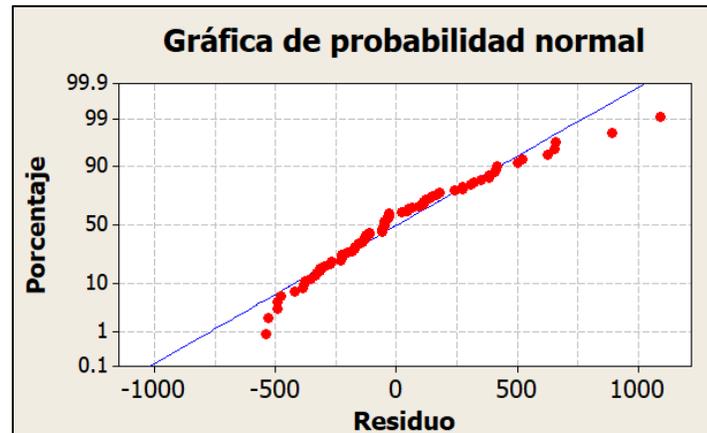


Figura A8.18. Prueba de Normalidad para los datos de módulos analizados

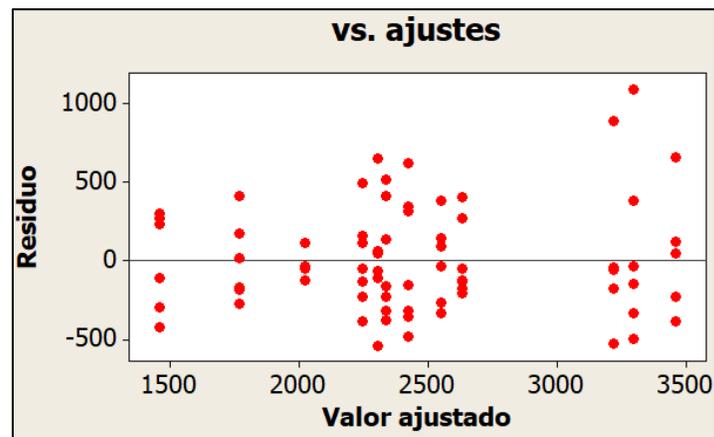


Figura A8.19. Análisis de valores ajustados vs residuales

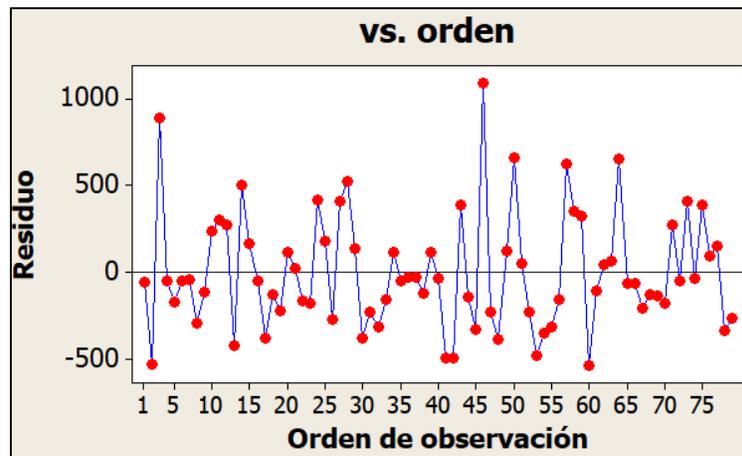


Figura A8.20. Distribución de residuales vs orden de observación



Anexo 9: Resultados ahuellamiento, regularidad y fricción

Tramo 015-M2079-19 Mezcla asfáltica sin material de desecho (control), sin acondicionamiento

- **Deformación permanente**

Tabla A9.1. Evolución de la deformación permanente – Tramo 015

ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
40000	0,00	0,00	0,00
60000	0,65	0,26	0,20
80000	0,72	0,29	0,21
100000	0,93	0,36	0,29
120000	1,16	0,57	0,49
160000	1,12	0,51	0,40
180000	1,33	0,50	0,39
200000	1,24	0,49	0,35
220.000	1,30	0,48	0,34
240000	1,27	0,59	0,46
260000	1,32	0,61	0,49
280000	1,26	0,51	0,38
300000	1,37	0,69	0,54
320000	1,44	0,74	0,55
340000	1,44	0,68	0,50
360000	1,55	0,77	0,58
380000	1,63	0,69	0,50
400000	1,63	0,73	0,55



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
450790	1,81	0,99	0,80
501581	2,02	1,06	0,82
552371	2,20	1,21	0,92
603161	2,88	1,66	1,40
653952	2,83	1,51	1,21
704742	3,00	1,56	1,27
755533	2,69	1,54	1,24
806323	3,01	1,72	1,40
857113	3,06	1,81	1,45
907904	3,21	2,01	1,62
1017643	3,29	2,04	1,64
1127382	3,95	2,36	1,95
1237121	3,87	2,43	2,02
1346860	4,34	2,70	2,24
1456599	4,38	2,58	2,11
1566338	4,63	2,90	2,43
1676077	4,77	3,04	2,54
1785817	5,14	3,14	2,61
1.895.556	5,02	3,29	2,76
2.005.295	5,49	3,38	2,83
2115034	5,70	3,54	2,97
2224773	5,60	3,60	3,03
2334512	6,04	3,84	3,25
2444251	5,95	3,80	3,19



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
2553990	6,58	4,11	3,52
2663729	6,72	4,21	3,54
2773469	6,65	4,22	3,54
2883208	6,83	4,35	3,66
2992947	6,96	4,38	3,64
3102686	7,17	4,57	3,82

** En la serie de datos anterior, se eliminaron los resultados previos a las 40.000 ESAL's y el correspondiente a los 140.000. Esto debido a inconsistencias en los resultados obtenidos.

- Índice de rugosidad internacional (IRI)

Tabla A9.2. Evolución del Índice de Regularidad Internacional – Tramo 015

ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
40000	6,55	6,17	6,79
60000	6,56	6,18	6,83
80000	6,58	6,20	6,84
100000	6,58	6,21	6,85
120000	6,60	6,23	6,87
140000	6,57	6,20	6,79
160000	6,61	6,20	6,87
180000	6,62	6,23	6,90
200000	6,62	6,28	6,90
220000	6,62	6,28	6,92

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 305 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
240000	6,65	6,23	6,94
260000	6,64	6,22	6,91
280000	6,65	6,27	6,92
300000	6,66	6,22	6,93
320000	6,66	6,24	6,93
340000	6,58	6,26	6,74
360000	6,67	6,22	6,92
380000	6,67	6,27	6,93
400000	6,68	6,24	6,95
450790	6,69	6,27	6,93
501581	6,68	6,28	6,93
552371	6,71	6,28	6,95
603161	6,69	6,24	6,94
653952	6,72	6,27	6,98
704742	6,74	6,28	6,99
755533	6,75	6,33	6,99
806323	6,75	6,32	6,99
857113	6,78	6,32	7,02
907904	6,79	6,35	7,03
1017643	6,80	6,35	7,04
1127382	6,82	6,36	7,06
1237121	6,84	6,40	7,10
1346860	6,88	6,42	7,13
1456599	6,87	6,41	7,11



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1566338	6,92	6,43	7,13
1676077	6,91	6,41	7,12
1785817	6,92	6,45	7,14
1895556	6,94	6,48	7,18
2005295	6,94	6,48	7,13
2115034	6,95	6,47	7,21
2224773	6,97	6,50	7,24
2334512	6,98	6,50	7,21
2444251	6,99	6,53	7,32
2553990	7,01	6,51	7,25
2663729	7,01	6,53	7,20
2773469	7,02	6,52	7,26
2883208	7,02	6,54	7,27
2992947	7,02	6,55	7,24
3102686	7,03	6,54	7,24

** En la serie de datos anterior, se eliminaron los resultados previos a las 40,000 ESAL's. Esto debido a inconsistencias en los resultados obtenidos.

- Fricción

Tabla A9.3. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo Control sin acondicionamiento (015) - Condición inicial

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO CONTROL SIN ACON. (015) - <u>CONDICION INICIAL</u>													
Informe:		INF-1479-2022											
Condición de análisis:		Ensayo en lado externo al tramo T-015											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	22,2	22,1	22,7	21,7	22	70	70	70	69	69	70	70	69
4	22,6	22,8	21,4	21,7	22	70	70	70	70	69	70	70	
5	22,5	22,7	21,6	21,9	22	65	65	65	65	65	65	65	
6	22,8	22,5	21,3	21,5	21	70	70	69	69	69	69	69	
7	22,7	22,7	21,3	21,8	22	79	78	77	77	78	78	78	
8	22,3	22,2	21,7	20,8	21	69	68	67	67	67	68	68	
9	22,5	22,4	20,8	21,6	21	70	70	70	69	69	70	70	
10	22,8	22,5	21,5	21,6	22	71	70	69	69	69	70	70	
11	22,6	22,6	21,4	21,7	22	71	71	70	70	70	70	70	
12	22,7	22,9	21	21,6	21	70	70	69	68	68	69	69	
13	22,9	22,6	21,3	21,2	21	69	70	70	70	69	70	70	
14	22,9	22,8	21,2	21,5	21	66	65	66	65	66	66	66	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 308 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tabla A9.4. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo Control sin acondicionamiento (015) - Condición final

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO CONTROL SIN ACON. (015) - CONDICION FINAL													
Informe:		INF-0758-2021											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-015											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
2	21.6	21.3	22.7	22.6	22.65	45	45	40	40	-	43	43	48
3	22.1	21.8	22.5	22.2	22.35	49	46	46	46	-	47	47	
4	21.7	21.9	22.6	22.2	22.4	51	50	48	49	-	50	50	
5	22.2	21.8	22.1	22.2	22.15	50	48	46	45	-	47	47	
6	22.2	22	21.8	21.7	21.75	50	49	46	45	-	48	48	
7	21.7	21.7	21.7	20.6	21.15	54	52	52	51	-	52	52	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 309 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tramo 019-M2083-19 Mezcla asfáltica sin material de desecho (control), con acondicionamiento por temperatura acondicionamiento

- Deformación permanente

Tabla A9.5. Evolución de la deformación permanente – Tramo 019

ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
0	0,00	0,00	0,00
10	0,96	0,3	0,14
20	0,92	0,29	0,06
50	0,71	0,27	0,02
100	0,76	0,24	0,00
250	0,79	0,26	-0,01
500	0,75	0,29	-0,01
1000	1,09	0,43	0,06
2000	1,6	0,69	0,22
5000	2,12	0,9	0,38
8000	2,29	1,03	0,46
10000	2,1	1,34	0,83
15013	2,57	1,34	0,69
19990	2,97	1,54	0,84
20000	2,74	1,84	1,23
40000	3,12	1,88	1,25
50004	3,74	2,14	1,28
51000	3,72	2,18	1,25
60000	3,85	2,5	1,69

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 310 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
80000	3,73	2,45	1,67
100000	3,87	2,68	1,74
120000	4,03	2,86	1,89
140000	4,16	2,92	1,88
149000	4,67	3,07	1,8
160000	4,43	3,18	2,09
180000	4,15	2,86	1,93
200000	4,42	3,09	2,06
220000	4,5	3,2	2,15
240000	4,42	3,25	2,18
250000	5,00	3,42	2,22
260000	4,77	3,48	2,48
280000	4,51	3,19	2,31
300000	4,59	3,41	2,36
320000	4,68	3,41	2,37
340000	4,73	3,47	2,4
351000	5,18	3,68	2,36
360000	5,11	3,89	2,72
380000	4,86	3,6	2,52
400000	4,9	3,62	2,53
450790	4,79	3,62	2,59
501581	4,92	3,79	2,77
529515	5,27	3,91	2,66

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 311 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
552371	5,4	4,2	3,00
603161	5,24	4,05	2,88
653952	5,1	3,98	2,87
704742	5,34	4,16	3,02
755533	5,46	4,24	3,11
783467	5,66	4,36	3,04
807674	5,62	4,55	3,12
857113	5,3	4,37	3,23
907904	5,3	4,35	3,24
1017643	5,44	4,43	3,35
1127382	5,58	4,59	3,37
1191579	5,89	4,79	3,36
1237121	6,14	5,12	3,83
1346860	5,71	4,86	3,63
1456599	5,68	4,87	3,76
1566338	5,86	5,09	3,93
1676077	5,95	5,14	4,01
1785817	6,4	5,65	4,43
1895556	6,23	5,47	4,16
2005295	6,37	5,52	4,27
2115034	6,45	5,7	4,37
2224773	6,53	5,69	4,44
2285130	6,69	5,9	4,36

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 312 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
2334512	6,97	6,2	4,89
2444251	6,81	6,06	4,75
2553990	6,79	6,02	4,72
2614347	6,91	6,11	4,62
2663729	7,01	6,2	4,85
2773469	7,19	6,48	5,15
2883208	7,13	6,33	4,98
2943564	7,19	6,37	4,93
2992947	7,13	6,34	5,06
3102686	7,14	6,28	5,12

** En la serie de datos anterior, se eliminaron los resultados asignados a los 1736434 ESAL's. Esto debido a inconsistencias en los resultados obtenidos.

- **Índice de rugosidad internacional (IRI)**

Tabla A9.6. Evolución del Índice de Regularidad Internacional – Tramo 019

ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
0	3,41	2,85	3,9
10	3,39	2,79	3,84
20	3,38	2,77	3,81
50	3,39	2,78	3,82
100	3,39	2,78	3,82
250	3,39	2,79	3,78
500	3,39	2,83	3,82

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 313 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1000	3,39	2,89	3,79
2000	3,38	2,85	3,78
5000	3,4	2,95	3,81
8000	3,4	2,96	3,82
10000	3,4	2,9	3,79
15013	3,41	2,94	3,88
19990	3,42	2,97	3,84
20000	3,41	2,92	3,82
40000	3,4	2,89	3,85
50004	3,42	2,97	3,82
51000	3,4	2,85	3,83
60000	3,4	2,93	3,82
80000	3,4	2,86	3,83
100000	3,4	2,9	3,82
120000	3,39	2,86	3,77
140000	3,41	2,92	3,85
149000	3,39	2,83	3,78
160000	3,4	2,93	3,79
180000	3,4	2,94	3,79
200000	3,4	2,92	3,83
220000	3,4	2,92	3,86
240000	3,4	2,92	3,78
250000	3,41	2,84	3,81

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 314 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
260000	3,4	2,92	3,78
280000	3,4	2,92	3,8
300000	3,41	2,94	3,8
320000	3,39	2,92	3,83
340000	3,39	2,93	3,81
351000	3,39	2,84	3,78
360000	3,39	2,92	3,78
380000	3,39	2,92	3,84
400000	3,39	2,92	3,79
450790	3,41	2,91	3,85
501581	3,38	2,91	3,77
529515	3,4	2,86	3,79
552371	3,39	2,95	3,77
603161	3,39	2,92	3,84
653952	3,41	2,91	3,78
704742	3,4	2,93	3,78
755533	3,41	2,92	3,84
783467	3,38	2,88	3,82
807674	3,38	2,9	3,79
857113	3,38	2,89	3,8
907904	3,41	2,92	3,79
1017643	3,38	2,91	3,81
1127382	3,38	2,89	3,78

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 315 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1191579	3,37	2,89	3,77
1237121	3,37	2,93	3,76
1346860	3,37	2,85	3,74
1456599	3,4	2,92	3,78
1566338	3,36	2,87	3,73
1676077	3,36	2,86	3,79
1736434	3,38	2,91	3,85
1785817	3,35	2,83	3,69
1895556	3,35	2,84	3,76
2005295	3,35	2,85	3,74
2115034	3,34	2,84	3,74
2224773	3,34	2,83	3,73
2285130	3,33	2,88	3,85
2334512	3,33	2,82	3,7
2444251	3,33	2,85	3,66
2553990	3,32	2,82	3,72
2614347	3,33	2,86	3,78
2663729	3,32	2,84	3,69
2773469	3,31	2,79	3,69
2883208	3,33	2,83	3,72
2943564	3,35	2,93	3,84
2992947	3,31	2,83	3,66
3102686	3,31	2,84	3,7

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 316 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

- Fricción

Tabla A9.7. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo Control con acondicionamiento (019) - Condición inicial

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO CONTROL CON ACON. (019) - CONDICION INICIAL													
Informe:			INF-1479-2022										
Condición de análisis:			Ensayo en lado externo al tramo T-019										
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	23,5	23,5	22,2	22,1	22	67	65	65	65	65	65	65	67
4	23,7	23,5	21,7	22,2	22	65	65	65	65	64	65	65	
5	23,6	23,7	21,9	22,3	22	66	66	67	66	66	66	66	
6	23,9	23,6	21,7	21,4	22	70	69	68	68	68	69	69	
7	23,6	23,3	21,7	21,3	22	67	66	66	65	66	66	66	
8	23,2	23,2	21,7	21,8	22	65	65	68	64	64	65	65	
9	23,4	23,1	21,6	21,3	21	75	75	75	75	75	75	75	
10	23,4	23,2	21,7	22	22	70	70	70	70	70	70	70	
11	23,8	23,4	21,9	22,3	22	74	74	74	73	73	74	74	
12	23,8	23,6	22,3	21,8	22	58	58	57	57	58	58	58	
13	24,2	24,4	22,3	21,3	22	60	60	60	60	60	60	60	
14	24,6	24,5	22	22,1	22	67	68	68	67	69	68	68	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 317 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Tabla A9.8. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo Control con acondicionamiento (019) - Condición final

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO CONTROL CON ACON. (019) - CONDICION FINAL													
Informe:		INF-0088-2022											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-019											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	18,2	-	17,9	17,3	18	60	58	58	58	56	58	57	59
4	18,4	-	17,7	17,3	18	60	61	60	60	60	60	59	
5	18,7	-	17,7	16,8	17	62	61	61	60	60	61	60	
6	19	-	17,5	17,1	17	59	60	59	59	58	59	58	
7	18,9	-	18,5	18,3	18	62	61	61	60	60	61	60	
8	18,7	-	18,3	18,9	19	62	60	60	60	58	60	60	
9	18,6	-	18,9	18,9	19	55	54	53	52	52	53	53	
10	18,6	-	18,4	18,6	19	65	64	63	61	61	63	63	
11	18,8	-	18,9	19	19	60	60	60	59	59	60	60	
12	18,9	-	18,7	18,6	19	61	60	60	59	59	60	60	
13	18,8	-	18,8	18,6	19	60	60	60	59	60	60	60	
14	18,7	-	18	18,7	18	59	59	60	58	57	59	58	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 318 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tramo 016-M2080-19 Mezcal asfáltica con 1.0% de PET, sin acondicionamiento

- **Deformación permanente**

Tabla A9.9. Evolución de la deformación permanente – Tramo 016

ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
0	0,31	0,04	0,00
10	0,51	0,25	0,11
20	0,66	0,29	0,11
50	0,69	0,29	0,13
100	0,65	0,29	0,14
250	0,76	0,42	0,2
500	0,75	0,45	0,23
1000	0,79	0,38	0,18
2000	0,95	0,41	0,18
5000	0,89	0,53	0,26
10000	1,04	0,45	0,28
20000	1,41	0,72	0,49
40000	1,62	0,95	0,70
60000	1,82	1,23	0,88
80000	1,99	1,44	1,04
100000	2,26	1,63	1,23
120000	2,44	1,70	1,34
140000	2,59	1,69	1,31
160000	2,77	2,02	1,59

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 319 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
180000	2,76	1,98	1,55
200000	3,38	2,49	1,87
220000	3,44	2,67	1,98
240000	3,55	2,69	2,08
260000	3,60	2,62	2,15
280000	3,63	2,69	2,24
300000	4,31	2,82	2,30
320000	4,08	3,09	2,50
340000	4,15	3,11	2,52
360000	4,14	3,16	2,56
380000	4,07	3,01	2,49
400000	4,78	3,16	2,61
450790	4,44	3,38	2,77
501581	4,53	3,42	2,78
552371	4,63	3,53	2,91
603161	4,58	3,52	2,90
653952	4,80	3,62	3,03
704742	4,93	3,71	3,12
755533	5,46	3,91	3,28
806323	5,5	3,95	3,33
857113	5,34	4,14	3,41
907904	5,53	4,29	3,54
1017643	5,80	4,59	3,72

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 320 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
1127382	5,71	4,48	3,73
1237121	6,11	4,84	3,93
1346860	6,39	4,98	4,09
1456599	6,47	5,09	4,19
1566338	6,75	5,23	4,35
1676077	6,59	5,22	4,42
1785817	7,10	5,42	4,55
2005295	7,65	5,94	5,02
2115034	7,39	5,79	4,90
2224773	7,70	6,05	5,01
2334512	7,80	6,17	5,16
444251	8,04	6,44	5,32
2553990	7,85	6,16	5,25
2663729	8,04	6,31	5,37
2773469	8,29	6,39	5,45
2883208	8,43	6,58	5,64
2992947	8,53	6,79	5,82
3102686	8,87	6,85	5,79

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 321 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



- Índice de rugosidad internacional (IRI)

Tabla A9.10. Evolución del Índice de Regularidad Internacional – Tramo 016

ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
0	6,21	5,09	6,92
10	6,22	5,12	6,92
20	6,22	5,11	6,89
50	6,22	5,14	6,87
100	6,23	5,17	6,87
250	6,22	5,14	6,85
500	6,22	5,13	6,92
1000	6,22	5,14	6,87
2000	6,21	5,17	6,90
5000	6,21	5,14	6,84
10000	6,22	5,14	6,89
20000	6,23	5,17	6,87
40000	6,26	5,19	6,90
60000	6,27	5,21	6,88
80000	6,30	5,22	6,91
100000	6,31	5,23	6,90
120000	6,33	5,24	6,91
140000	6,35	5,24	6,95
160000	6,36	5,25	6,91
180000	6,36	5,25	6,92

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 322 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
200000	6,40	5,25	6,96
220000	6,38	5,28	6,93
240000	6,40	5,28	6,95
260000	6,41	5,30	6,95
280000	6,43	5,30	6,96
300000	6,43	5,32	6,98
320000	6,44	5,32	7,01
340000	6,45	5,33	7,03
360000	6,47	5,33	7,03
380000	6,48	5,34	7,06
400000	6,47	5,37	6,98
450790	6,46	5,36	6,99
501581	6,48	5,37	7,05
552371	6,48	5,36	7,00
603161	6,49	5,36	7,06
653952	6,50	5,37	7,05
704742	6,50	5,38	7,01
755533	6,49	5,39	7,02
806323	6,51	5,38	7,01
857113	6,51	5,36	7,02
907904	6,51	5,35	7,08
1017643	6,50	5,34	7,05
1127382	6,51	5,36	7,06

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 323 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1237121	6,52	5,43	7,00
1346860	6,51	5,44	7,00
1456599	6,51	5,43	6,99
1566338	6,52	5,46	7,00
1676077	6,53	5,41	7,03
1785817	6,54	5,48	7,02
2005295	6,51	5,45	7,02
2115034	6,52	5,43	7,01
2224773	6,53	5,45	7,00
2334512	6,53	5,45	7,01
2444251	6,56	5,48	7,05
2553990	6,57	5,45	7,07
2663729	6,56	5,43	7,06
2773469	6,56	5,43	7,06
2883208	6,59	5,50	7,07
2992947	6,58	5,43	7,06
3102686	6,61	5,49	7,09

- Fricción

Tabla A9.11. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PET sin acondicionamiento (016) - Condición inicial

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PET SIN ACON. (016) - CONDICION INICIAL													
Informe:		INF-1479-2022											
Condición de análisis:		Ensayo en lado externo al tramo T-016											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	23	23	21,4	21,9	22	75	75	74	74	74	74	74	72
4	22,5	22,5	21,5	21,6	22	78	78	79	80	79	79	79	
5	23,1	22,9	21,5	21,7	22	80	80	80	80	80	80	80	
6	23,4	23,2	21,8	21,7	22	76	75	75	75	74	75	75	
7	23,6	22,1	22,1	21,9	22	70	70	70	69	69	70	70	
8	23,4	23,3	21,6	22,1	22	70	70	69	68	68	69	69	
9	23,3	23,2	20,5	21,5	21	68	68	67	67	66	67	67	
10	23,4	23,4	21,5	21,6	22	73	72	72	72	71	72	72	
11	22,8	22,9	21,7	21,7	22	75	75	75	74	74	75	75	
12	22,9	23,1	21,7	21,3	22	70	68	66	66	65	67	67	
13	23,1	23	21,3	21,7	22	64	63	62	63	62	63	63	
14	23,2	23,2	21,3	21,4	21	75	75	75	75	75	75	75	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 325 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tabla A9.12. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PET sin acondicionamiento (016) - Condición final

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PET SIN ACON. (016) - CONDICION FINAL													
Informe:		INF-0758-2021											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-016											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
2	-	22,5	21,6	22	21,8	44	43	42	44	-	43.25	43	45
3	-	22	21,8	22,1	21,95	48	47	47	47	-	47.25	47	
4	-	22,9	23	22,1	22,55	44	43	43	44	-	43.5	44	
5	-	22,1	21,8	22,5	22,15	45	45	45	42	-	44.25	44	
6	-	22,3	22,1	22,5	22,3	45	44	44	44	-	44.25	44	
7	-	22,1	21,8	22,5	22,15	50	48	48	48	-	48.5	49	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 326 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tramo 020-M2084-19 Mezcal asfáltica con 1.0% de PET, con acondicionamiento por temperatura

- **Deformación permanente**

Tabla A9.13. Evolución de la deformación permanente – Tramo 020

ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
0	0,00	0,00	0,00
10	0,71	0,18	0,08
20	0,63	0,15	0,01
50	0,67	0,17	-0,06
100	0,64	0,15	-0,10
250	0,77	0,18	-0,10
500	0,77	0,25	-0,08
1000	0,78	0,33	-0,03
2000	1,06	0,56	0,13
5000	1,17	0,85	0,53
10000	1,35	0,88	0,35
20000	1,71	1,41	0,89
40000	1,96	1,47	1,01
60000	2,10	1,61	1,16
71000	2,30	1,75	1,17
80000	2,52	1,95	1,45
100000	2,31	1,81	1,30
120000	2,47	1,85	1,38
140000	2,57	1,99	1,46



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
160000	2,61	2,06	1,54
171000	2,92	2,33	1,57
180000	2,95	2,50	1,84
200000	2,89	2,18	1,66
220000	2,80	2,24	1,70
240000	2,96	2,32	1,80
260000	3,34	2,50	1,88
270000	3,20	2,62	1,80
280000	3,32	2,81	2,12
300000	3,20	2,48	1,92
320000	3,31	2,58	1,94
340000	3,41	2,71	2,01
351000	3,50	2,78	1,89
360000	3,47	2,81	2,06
380000	3,78	3,15	2,28
449521	3,62	2,81	2,21
500311	3,49	2,88	2,22
551355	3,71	2,94	2,30
577766	3,69	3,05	2,10
603161	3,94	3,28	2,51
653952	3,90	3,07	2,35
704742	3,80	3,09	2,45
745628	4,06	3,44	2,78

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 328 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
755533	3,95	3,29	2,33
796419	3,86	3,13	2,51
806323	3,88	3,19	2,33
824099	4,08	3,33	2,45
857113	4,07	3,46	2,82
907904	4,00	3,29	2,58
1017643	4,22	3,42	2,72
1127382	4,28	3,56	2,84
1237121	4,56	3,70	2,92
1297477	4,51	3,77	2,85
1346860	4,58	3,93	3,18
1456599	4,52	3,82	3,12
1566338	4,67	3,85	3,08
1676077	4,90	4,08	3,25
1785817	5,06	4,13	3,29
1846173	5,10	4,31	3,24
1895556	5,04	4,28	3,51
2005295	5,05	4,29	3,53
2115034	5,17	4,35	3,56
2224773	5,33	4,44	3,64
2334512	5,27	4,49	3,7
2394869	5,51	4,7	3,7
2444251	5,55	4,68	3,9

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 329 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
2553990	5,55	4,59	3,77
2663729	5,52	4,74	3,92
2773469	5,52	4,81	3,95
2831082	5,69	4,75	3,79
2883208	5,72	4,83	3,93
2992947	5,94	5,04	4,19
3102686	5,93	5,09	4,15

- Índice de rugosidad internacional (IRI)

Tabla A9.14. Evolución del Índice de Regularidad Internacional – Tramo 020

ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
0	3,72	3,25	4,03
10	3,67	3,23	3,93
20	3,68	3,17	3,94
50	3,69	3,26	3,97
100	3,69	3,27	3,97
250	3,67	3,25	3,94
500	3,67	3,25	3,96
1000	3,65	3,22	3,91
2000	3,63	3,12	3,89

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 330 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
5000	3,59	3,18	3,85
10000	3,6	3,11	3,87
20000	3,55	3,15	3,82
40000	3,54	3,12	3,82
60000	3,53	3,11	3,82
71000	3,56	3,08	3,82
80000	3,54	3,14	3,82
100000	3,53	3,1	3,78
120000	3,52	3,11	3,78
140000	3,51	3,08	3,78
160000	3,51	3,1	3,77
180000	3,5	3,11	3,75
200000	3,5	3,07	3,78
220000	3,5	3,09	3,78
240000	3,49	3,1	3,77
260000	3,49	3,08	3,76
270000	3,52	3,11	3,78
280000	3,48	3,09	3,75
300000	3,49	3,06	3,75
320000	3,48	3,05	3,76
340000	3,48	3,08	3,74
351000	3,49	3	3,79
360000	3,47	3,09	3,73

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 331 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
380000	3,48	3,1	3,74
400000	3,48	3,15	3,77
449521	3,48	3,09	3,76
500311	3,48	3,07	3,76
551355	3,45	3,05	3,73
577766	3,49	3,13	3,76
603161	3,46	3,1	3,74
653952	3,46	3,04	3,76
704742	3,46	3,04	3,74
745628	3,44	3,05	3,72
755533	3,47	3,08	3,77
796419	3,46	3,06	3,74
806323	3,47	3,01	3,77
824099	3,47	2,99	3,78
857113	3,44	3,09	3,73
907904	3,44	3,06	3,73
1017643	3,44	3,05	3,73
1127382	3,44	3,06	3,74
1237121	3,44	3,06	3,73
1297477	3,45	2,98	3,77
1346860	3,42	3,07	3,73
1456599	3,44	3,07	3,75
1566338	3,43	3,06	3,74

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 332 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1676077	3,42	3,02	3,73
1785817	3,42	3,04	3,74
1846173	3,44	2,95	3,78
1895556	3,41	3,06	3,73
2005295	3,43	3,09	3,74
2115034	3,43	3,11	3,75
2224773	3,43	3,09	3,74
2394869	3,44	3,06	3,77
2444251	3,39	3,03	3,74
2553990	3,45	3,11	3,77
2663729	3,42	3,05	3,77
2773469	3,42	3,06	3,77
2831082	3,46	3,08	3,8
2883208	3,42	3,08	3,75
2992947	3,39	3,02	3,73
3102686	3,43	3,11	3,77

Fricción

Tabla A9.15. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PET con acondicionamiento (020) - Condición inicial

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PET CON ACON. (020) - CONDICION INICIAL													
Informe:		INF-1707-2022											
Condición de análisis:		Ensayo en lado externo al tramo T-020											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	21,7	-	20,9	21,2	21	71	71	72	71	71	71	71	73
4	21,9	-	21	21,5	21	76	76	75	75	75	75	75	
5	21,8	-	21,3	21,2	21	65	65	65	65	65	65	65	
6	22,4	-	21,1	21,1	21	67	66	66	65	66	66	66	
7	22,4	-	21	21,2	21	75	75	74	74	74	74	74	
8	22,4	-	21	20,4	21	80	81	80	79	80	80	80	
9	22,8	-	20,7	20,8	21	80	80	81	80	80	80	80	
10	22	-	20,2	20,1	20	70	70	70	70	69	70	70	
11	22,1	-	20,7	20,2	20	75	75	74	75	75	75	75	
12	22,1	-	20,1	21,2	21	76	75	75	76	75	75	75	
13	21,9	-	19,6	20,3	20	70	70	70	71	71	70	70	
14	22,1	-	20,6	20,8	21	75	74	73	73	73	74	74	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 334 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Tabla A9.16. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PET con acondicionamiento (020) - Condición final

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PET CON ACON. (020) - CONDICION FINAL													
Informe:		INF-0474-2022											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-020											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	21	21	20	20	20	44	43	44	43	44	44	44	44
4	21	21	20	21	21	46	45	46	45	45	45	45	
5	22	22	20	21	21	46	46	46	46	45	46	46	
6	22	22	20	22	21	44	44	45	44	44	44	44	
7	21	22	20	22	21	44	45	45	45	44	45	45	
8	22	21	20	21	21	45	43	45	44	44	44	44	
9	21	22	20	20	20	44	45	45	45	44	45	45	
10	22	21	20	19	20	45	43	45	44	44	44	44	
11	22	22	20	20	20	42	43	45	44	43	43	43	
12	21	21	19	20	20	45	45	44	44	44	44	44	
13	21	21	19	19	19	46	46	47	47	48	47	47	
14	21	21	20	20	20	42	42	43	42	43	42	42	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 335 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tramo 017-M2081-19 Mezcal asfáltica con 1.0% de PEAD, sin acondicionamiento

- **Deformación permanente**

Tabla A9.17. Evolución de la deformación permanente – Tramo 017

ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
0	0	0	0
10	0,28	0,05	0,01
20	0,41	0,08	0,03
50	0,43	0,12	0,06
100	0,7	0,16	0,08
250	0,81	0,21	0,1
500	0,74	0,23	0,08
1000	0,52	0,21	0,06
2000	0,55	0,13	0,04
5000	0,94	0,45	0,22
10000	0,93	0,44	0,19
20000	0,99	0,44	0,24
40000	1,31	0,73	0,46
60000	1,62	1,02	0,66
80000	1,61	1,05	0,74
100000	1,71	1,18	0,88
120000	1,6	1,11	0,87
140000	1,79	1,29	0,98
160000	1,97	1,45	1,1

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 336 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
180000	1,96	1,5	1,18
200000	2,04	1,64	1,28
220000	2,08	1,61	1,19
240000	2,05	1,7	1,33
260000	2,19	1,79	1,35
280000	2,14	1,72	1,37
300000	2,23	1,81	1,42
320000	2,41	1,91	1,53
340000	2,54	2,01	1,65
360000	2,63	2,05	1,72
380000	2,65	2,13	1,74
400000	2,62	2,12	1,68
450790	2,77	2,18	1,76
501581	2,89	2,41	1,94
552371	3,03	2,41	2
603161	3,13	2,57	2,02
653952	3,13	2,55	2,08
704742	3,51	2,77	2,27
755533	3,47	2,84	2,34
806323	3,48	2,89	2,31
857113	3,48	2,86	2,4
907904	3,66	3,02	2,44
1017643	4,03	3,27	2,64

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 337 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
1127382	4,08	3,36	2,74
1237121	4,07	3,39	2,76
1346860	4,21	3,49	2,94
1456599	4,64	3,72	2,98
1566338	4,78	3,88	3,14
1676077	4,98	4,03	3,27
1785817	4,89	4,03	3,26
1895556	4,91	4,09	3,46
2005295	5,13	4,23	3,61
2115034	5,42	4,48	3,75
2224773	5,52	4,6	3,84
2334512	5,54	4,62	3,75
2444251	5,46	4,53	3,85
2553990	5,78	4,69	3,99
2663729	6,07	4,97	4,22
2773469	6,09	5,06	4,19
2883208	6,13	5,14	4,13
2992947	6,24	5,17	4,25
3102686	6,36	5,26	4,36



- Índice de rugosidad internacional (IRI)

Tabla A9.18. Evolución del Índice de Regularidad Internacional – Tramo 017

ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
0	1,34	0,84	2,06
10	1,34	0,86	2,06
20	1,35	0,92	2,05
50	1,35	0,84	2,06
100	1,34	0,88	2,02
250	1,33	0,9	2,01
500	1,33	0,91	2,06
1000	1,33	0,88	2,06
2000	1,33	0,92	2,07
5000	1,31	0,89	2,03
10000	1,32	0,88	2,06
20000	1,31	0,82	2,06
40000	1,29	0,85	2,04
60000	1,29	0,82	2,09
80000	1,28	0,81	2,02
100000	1,26	0,79	2
120000	1,27	0,84	2,02
140000	1,25	0,79	2
160000	1,23	0,78	1,96
180000	1,23	0,76	1,99

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 339 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
200000	1,23	0,79	2,01
220000	1,22	0,8	2,05
240000	1,21	0,77	2,01
260000	1,21	0,79	2,03
280000	1,21	0,8	2,01
300000	1,21	0,78	1,99
320000	1,18	0,76	1,97
340000	1,19	0,8	1,96
360000	1,18	0,75	1,98
380000	1,18	0,76	2,02
400000	1,18	0,79	1,95
450790	1,16	0,75	1,96
501581	1,16	0,71	1,97
552371	1,15	0,7	1,94
603161	1,15	0,72	1,93
653952	1,14	0,69	1,94
704742	1,14	0,7	1,91
755533	1,13	0,68	1,92
806323	1,14	0,64	2,02
857113	1,14	0,67	1,97
907904	1,13	0,7	1,96
1017643	1,12	0,63	1,94
1127382	1,12	0,64	1,94

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 340 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1237121	1,12	0,64	1,94
1346860	1,12	0,66	1,9
1456599	1,11	0,67	1,89
1566338	1,12	0,65	1,9
1676077	1,12	0,67	1,89
1785817	1,13	0,64	1,87
1895556	1,12	0,66	1,91
2005295	1,12	0,68	1,86
2115034	1,12	0,67	1,84
2224773	1,13	0,67	1,85
2334512	1,14	0,67	1,85
2444251	1,14	0,66	1,88
2553990	1,14	0,71	1,84
2663729	1,14	0,69	1,83
2773469	1,14	0,68	1,83
2883208	1,15	0,68	1,83
2992947	1,15	0,71	1,84
3102686	1,15	0,71	1,84

- Fricción

Tabla A9.19. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PEAD sin acondicionamiento (017) - Condición inicial

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PEAD SIN ACON. (017) - CONDICION INICIAL													
Informe:		INF-0758-2021											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-017											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
2	-	21,2	21,2	22,1	21,65	75	72	70	72	-	72	72	73
3	-	21,5	21,4	21,7	21,55	78	74	72	74	-	75	75	
4	-	20,6	22,1	21,4	21,75	75	74	72	72	-	73	73	
5	-	20,6	20	21	20,5	73	72	73	70	-	72	72	
6	-	20,6	20,1	21	20,55	75	75	74	78	-	76	76	
7	-	20,6	20,4	20,8	20,6	75	70	70	70	-	71	71	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 342 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tabla A9.20 Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PEAD sin acondicionamiento (017) - Condición Final

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PEAD SIN ACON. (017) - CONDICION FINAL													
Informe:		INF-0025-2021											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-017											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	21	-	22	22	22	51	51	50	51	51	51	51	54
4	21	-	22	22	22	53	54	53	52	52	53	53	
5	21	-	22	22	22	51	50	49	49	49	50	50	
6	21	-	21	22	21,5	56	56	55	56	56	56	56	
7	21	-	21	21	21	53	53	51	53	53	53	53	
8	21	-	21	21	21	54	54	54	54	54	54	54	
9	21,1	-	22	20,5	21,25	53	52	52	50	51	52	52	
10	21,5	-	21,5	20,5	21	57	57	57	57	57	57	57	
11	21	-	21,5	22,5	22	50	49	50	49	49	49	49	
12	21	-	21,5	22,5	22	55	54	54	53	54	54	54	
13	21,5	-	21	20,5	20,75	56	57	58	57	56	57	57	
14	21	-	22,5	22,5	22,5	59	60	58	58	60	59	59	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 343 de 368
-----------------------------------	-----------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Tramo 021-M2084-19 Mezcal asfáltica con 1.0% de PEAD, con acondicionamiento por temperatura

- **Deformación permanente**

Tabla A9.21. Evolución de la deformación permanente – Tramo 021

ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
0	0	0	0
10	0,89	0,28	0,13
20	0,88	0,28	0,06
50	1,07	0,21	-0,05
100	0,87	0,25	-0,05
250	0,76	0,24	-0,07
500	0,88	0,29	-0,06
1000	1	0,36	-0,03
2000	1,23	0,64	0,16
5000	1,49	0,78	0,31
10000	1,72	1,23	0,8
20000	2,16	1,6	0,93
31000	2,14	1,48	0,89
40000	2,61	1,84	1,4
60000	2,71	1,73	1,25
80000	3,09	2,02	1,47
100000	3,17	2,16	1,59
111000	2,96	2,13	1,52
120000	3,52	2,3	1,71

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 344 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
140000	3,67	2,73	2,07
160000	3,74	2,62	2,01
180000	3,86	2,67	2,04
200000	4,19	2,77	2,13
220000	4,23	2,87	2,22
231000	3,83	2,92	2,12
240000	4,28	3,09	2,44
260000	4,29	3,03	2,34
280000	4,36	3,06	2,38
300000	4,37	3,09	2,42
320000	4,48	3,2	2,5
330500	4,2	3,17	2,34
340000	4,71	3,62	2,79
360000	4,58	3,38	2,64
373200	4,92	3,52	2,83
380000	4,37	3,42	2,5
393000	4,73	3,34	2,65
400000	4,5	3,4	2,53
433014	4,82	3,44	2,68
501581	4,98	3,89	3,00
552371	5,02	3,71	2,90
603161	5,15	3,68	2,94
653952	5,23	3,89	3,05
704742	5,36	3,9	3,08



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
731407	5,17	4,04	3,01
755533	5,67	4,27	3,42
806323	5,59	4,15	3,28
857113	5,7	4,14	3,31
885048	5,42	4,17	3,17
907904	5,79	4,16	3,34
1012156	5,95	4,3	3,46
1127382	6,17	4,7	3,78
1237121	6,2	4,59	3,69
1346860	6,21	4,64	3,74
1456599	6,51	4,71	3,86
1566338	6,55	4,82	3,93
1626695	6,39	4,91	3,86
1676077	6,9	5,14	4,23
1785817	6,86	5,02	4,15
1895556	7,09	5,15	4,25
2005295	7,1	5,16	4,24
2115034	7,23	5,33	4,4
2169903	6,89	5,44	4,27
2224773	7,52	5,58	4,66
2334512	7,47	5,52	4,57
2436021	7,48	5,47	4,53
2543565	7,63	5,59	4,6
2553990	7,25	5,54	4,43

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 346 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	Máxima Def. absoluta (mm)	Máxima Def. media (mm)	Def. Media del tramo (mm)
2652756	7,77	5,71	4,7
2707625	7,35	5,68	4,53
2773469	8,04	5,99	4,96
2883208	7,86	5,77	4,81
2992947	8,02	5,92	4,91
3053303	7,77	5,91	4,79
3102686	8,14	6,04	4,99

- Índice de rugosidad internacional (IRI)

Tabla A9.22. Evolución del Índice de Regularidad Internacional – Tramo 021

ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
0	3,41	2,85	3,9
10	3,39	2,79	3,84
20	3,38	2,77	3,81
50	3,39	2,78	3,82
100	3,39	2,78	3,82
250	3,39	2,79	3,78
500	3,39	2,83	3,82
1000	3,39	2,89	3,79
2000	3,38	2,85	3,78
5000	3,4	2,95	3,81
8000	3,4	2,96	3,82

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 347 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
10000	3,4	2,9	3,79
15013	3,41	2,94	3,88
19990	3,42	2,97	3,84
20000	3,41	2,92	3,82
40000	3,4	2,89	3,85
50004	3,42	2,97	3,82
51000	3,4	2,85	3,83
60000	3,4	2,93	3,82
80000	3,4	2,86	3,83
100000	3,4	2,9	3,82
120000	3,39	2,86	3,77
140000	3,41	2,92	3,85
149000	3,39	2,83	3,78
160000	3,4	2,93	3,79
180000	3,4	2,94	3,79
200000	3,4	2,92	3,83
220000	3,4	2,92	3,86
240000	3,4	2,92	3,78
250000	3,41	2,84	3,81
260000	3,4	2,92	3,78
280000	3,4	2,92	3,8
300000	3,41	2,94	3,8
320000	3,39	2,92	3,83
340000	3,39	2,93	3,81

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 348 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
351000	3,39	2,84	3,78
360000	3,39	2,92	3,78
380000	3,39	2,92	3,84
400000	3,39	2,92	3,79
450790	3,41	2,91	3,85
501581	3,38	2,91	3,77
529515	3,4	2,86	3,79
552371	3,39	2,95	3,77
603161	3,39	2,92	3,84
653952	3,41	2,91	3,78
704742	3,4	2,93	3,78
755533	3,41	2,92	3,84
783467	3,38	2,88	3,82
807674	3,38	2,9	3,79
857113	3,38	2,89	3,8
907904	3,41	2,92	3,79
1017643	3,38	2,91	3,81
1127382	3,38	2,89	3,78
1191579	3,37	2,89	3,77
1237121	3,37	2,93	3,76
1346860	3,37	2,85	3,74
1456599	3,4	2,92	3,78
1566338	3,36	2,87	3,73
1676077	3,36	2,86	3,79

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 349 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



ESAL's	IRI Promedio (m/km)	IRI Mínimo (m/km)	IRI Máximo (m/km)
1736434	3,38	2,91	3,85
1785817	3,35	2,83	3,69
1895556	3,35	2,84	3,76
2005295	3,35	2,85	3,74
2115034	3,34	2,84	3,74
2224773	3,34	2,83	3,73
2285130	3,33	2,88	3,85
2334512	3,33	2,82	3,7
2444251	3,33	2,85	3,66
2553990	3,32	2,82	3,72
2614347	3,33	2,86	3,78
2663729	3,32	2,84	3,69
2773469	3,31	2,79	3,69
2883208	3,33	2,83	3,72
2943564	3,35	2,93	3,84
2992947	3,31	2,83	3,66
3102686	3,31	2,84	3,7

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 350 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

- Fricción

Tabla A9.23. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PEAD con acondicionamiento (021) - Condición inicial

RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PEAD CON ACON. (021) - CONDICION INICIAL													
Informe:		INF-0758-2021											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-021											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patín mojado (°C)		Temp. Patín _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
2	-	22	21,2	21,7	21,45	80	88	78	77	-	78	78	75
3	-	21,8	21	22	21,5	75	74	74	72	-	74	74	
4	-	21,4	21,3	21,8	21,55	78	78	75	71	-	76	76	
5	-	21,4	21,3	22	21,65	68	70	75	72	-	71	71	
6	-	21,1	20,8	21,8	21,3	80	80	81	79	-	80	80	
7	-	21,1	21,3	22	21,65	70	72	70	73	-	71	71	

Tabla A9.24. Resultados del péndulo (PVT) - Tramo 1.0 % PEAD con acondicionamiento (021) - Condición Final

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 351 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



RESULTADOS DEL PENDULO (PVT) - TRAMO PEAD CON ACON. (021) - CONDICION FINAL													
Informe:		INF-0965-2022											
Condición de análisis:		Ensayo en zona interna del tramo T-021											
Puntos	Temp. Superficie mojada (°C)		Temp. Patin mojado (°C)		Temp. Patin _{prom} (°C)	Medición					PTV	PTV _{CORR}	PTV _{ZONA}
	Pre. Ensayo	Post. ensayo	Pre. Ensayo	Post. ensayo		1	2	3	4	5			
3	21,7	21,6	20,4	20,8	21	54	53	52	52	53	53	53	55
4	22	21,7	20,6	20,6	21	56	56	56	56	57	56	56	
5	21,9	21,8	20,5	20,4	20	56	58	58	58	58	58	58	
6	21,9	21,8	20,6	20,2	20	58	57	58	58	57	58	58	
7	21,9	21,5	20,7	20,3	21	54	55	55	54	55	55	55	
8	21,8	21,6	2,3	20,2	11	57	58	57	58	58	58	58	
9	21,6	21,5	20	20,1	20	58	58	57	57	58	58	58	
10	21,4	21,5	20,7	20,3	21	55	55	55	54	54	55	55	
11	21,6	21,5	20,4	20,2	20	53	54	54	54	54	54	54	
12	21,7	21,5	20,2	20,5	20	50	50	51	51	51	51	51	
13	21,6	21,6	20	20,1	20	55	54	54	54	53	54	54	
3	21,7	21,6	20,4	20,8	21	54	53	52	52	53	53	53	

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 352 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Anexo 100: Resultados de desempeño a la mezcla asfáltica

Tramo de Control (015 y 019)

- Resistencia retenida

Tabla A10.1. Resultados de la resistencia retenida a la tensión diametral – Tramo control

Resultados de la resistencia retenida a la tensión diametral por el daño inducido con agua						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	Resistencia retenida a la tensión diametral (%)
1	7,9	Secas + 2 horas a 25 °C	-	34304	1532	-
4	8,1		-	35099	1568	
5	7,7		-	32146	1436	
Promedios	7,9	-	-	33850	1512	
Desv. Est.	0,2	-	-	1528	69	
2	8	Saturación + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	73.3	27376	1223	79,8
3	8		70.5	27354	1223	78
6	7,7		75.4	27207	1215	84,6
Promedios	7,9	-	73.1	27312	1220	80,8
Desv. Est.	0,2	-	2.4	92	5	3,4



- Flow Number

Tabla A10.2. Resultados para Flow Number– Tramo control

Resultados de la deformación permanente por Flow Number							
Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Esfuerzo desviador promedio (kPa)	Esfuerzo contacto promedio (kPa)	Error estándar máximo de la carga (%)	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN (1×10^{-6} mm/mm)
4	7,3	58	599,1	30	2,07	472	26,140
5	7,4	58	598,9	30	1,86	557	20,984
6	7,3	57,99	599	30	1,98	565	22,197
Promedio	7,3	58	599	30	2	531	23,107
Desvest	0,1	0,01	0,1	0	0,1	52	2,696

- APA

Tabla A10.3. Resultados del Asphalt Pavement Analyzer (APA) – Tramo control

Resultados del porcentaje de vacíos y deformación permanente en el equipo APA				
Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Deformación (mm)
1	7,4	60,1	LI	1,595
2	7,5			
3	7,3		LC	2,195
4	7,6			
5	7,3		LD	2,096
6	7,3			
Promedio	7,4			1,962
Desv. Est.	0,1			0,322

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 354 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



- Rueda de Hamburgo

Tabla A10.4. Resultados para Rueda de Hamburgo – Tramo control

Resultados del ensayo de deformación permanente en la Rueda de Hamburgo					
Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Impresión a las 20 000 pasadas	Cantidad de ciclos del punto de inflexión PSI
1	7,3	49,9	LI	-2,623	NA
2	7,2				
3	7,1		LD	-2,57	NA
4	7,1				
Promedio	7,2			-2,596	
Desvest	0,1			0,037	

- Fatiga

Tabla A10.5. Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción 400µs– Tramo control

Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción para el ensayo a deformación controlada a 400 microstrain						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1x10 ⁻⁶ mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V1	7,2	20	400	6,459	3,226	183672
B1-V4	7,5	20	399	6,054	3,016	159921
B2-V1	6,7	20	399	6,326	3,162	123571
B2-V4	7,5	20	399	6,115	3,057	113447
Promedio	7,2	20	399	6,239	3,115	145153
Desv. Est.	0,4	0	1	188	96	32521

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 355 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Tabla A10.6. Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción 600 μ s– Tramo control

Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción para el ensayo a deformación controlada a 600 microstrain						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V2	7,3	19,9	601	6210	3100	20212
B1-V3	7,5	19,9	601	5550	2771	18916
B2-V2	7	19,9	600	5719	2853	9036
B2-V3	7,6	19,9	599	5329	2658	10893
Promedio	7,4	19,9	600	5702	2846	14764
Desv. Est.	0,3	0	1	374	188	5619



Tramo de Modificado 1% PET (016 y 020)

- Resistencia retenida

Tabla A10.7. Resultados de la resistencia retenida a la tensión diametral – Tramo 1% PET

Resultados de la resistencia retenida a la tensión diametral por el daño inducido con agua						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	Resistencia retenida a la tensión diametral (%)
1	8,1	Secas + 2 horas a 25 °C	-	12174	653	-
2	7,1		-	13762	736	
5	6,9		-	14180	787	
Promedios	7,4	-	-	13372	727	
Desv. Est.	0,6	-	-	1058	68	
3	7,8	Saturación + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	78	10405	530	81,2
4	6,9		70,8	11630	625	84,9
6	7,2		77,5	11846	644	81,8
Promedios	7,3	-	75,5	11294	600	82,6
Desv. Est.	0,5	-	4	777	61	2



- Flow Number

Tabla A10.8. Resultados para Flow Number– Tramo 1% PET

Resultados de la deformación permanente por Flow Number							
Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Esfuerzo desviador promedio (kPa)	Esfuerzo contacto promedio (kPa)	Error estándar máximo de la carga (%)	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN (1x10 ⁻⁶ mm/mm)
4	6,9	57,99	598,9	30	1,68	2269	26308
5	7,2	57,99	598,8	30	1,54	3115	26406
6	6,8	57,98	598,8	30	1,56	2699	22236
Promedio	6,97	57,99	598,8	30	1,6	2694	24983
Desvest	0,21	0,01	0,1	0	0,1	423	2380

- APA

Tabla A10.9. Resultados del Asphalt Pavement Analyzer (APA) – Tramo 1% PET

Resultados del porcentaje de vacíos y deformación permanente en el equipo APA				
Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Deformación (mm)
1	6,9	60,2	LI	1,257
2	6,8			
3	6,5		LC	1,213
4	6,4			
5	6,4		LD	1,172
6	6,8			
Promedio	6,6			1,214
Desv. Est.	0,2			0,042

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 358 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



- Rueda de Hamburgo

Tabla A10.10. Resultados para Rueda de Hamburgo – Tramo 1% PET

Resultados del ensayo de deformación permanente en la Rueda de Hamburgo					
Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Impresión a las 20 000 pasadas	Cantidad de ciclos del punto de inflexión PSI
1	7,4	50.0	LI	-2,035	NA
2	7,9				
3	7,6		LD	-1,971	NA
4	7,9				
Promedio	7,7			-2,003	
Desvest	0,3			0,045	

- Fatiga

Tabla A10.11. Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción 400µs– Tramo 1% PET

Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción para el ensayo a deformación controlada a 400 microstrain						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B2-V1	6,9	20,1	400	6,965	3480	149512
B2-V4	7,2	20	400	7,330	3650	103361
B3-V1	6,6	20,1	400	7,530	3764	105122
B3-V4	6,5	19,9	399	7,790	3883	64553
Promedio	6,8	20	400	7,404	3694	105637
Desv. Est.	0,3	0,1	1	348	172	34729

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 359 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Tabla A10.12. Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción 600 μ s– Tramo 1% PET

Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción para el ensayo a deformación controlada a 600 microstrain						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1×10^{-6} mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B2-V2	6,7	19,8	601	6,584	3282	14955
B2-V3	7,1	19,9	600	6,471	3230	15887
B3-V2	6,5	20	600	6,950	3468	10492
B3-V3	6,6	20,1	599	6,644	3314	18853
Promedio	6,7	20	600	6,662	3324	15047
Desv. Est.	0,3	0,1	1	205	102	3462



Tramo de Modificado 1% PEAD (017 y 021)

- Resistencia retenida

Tabla A10.13. Resultados de la resistencia retenida a la tensión diametral–Tramo 1% PEAD

Resultados de la resistencia retenida a la tensión diametral por el daño inducido con agua						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Tipo de acondicionamiento	Saturación (%)	Carga máxima (N)	Esfuerzo a tensión (kPa)	Resistencia retenida a la tensión diametral (%)
1	6,9	Secas + 2 horas a 25 °C	-	30082	1343	-
2	6,9		-	31789	1420	
3	6,7		-	30457	1361	
Promedios	6,8	-	-	30776	1375	
Desv. Est.	0,1	-	-	897	40	
4	6,7	Saturación + 24 horas a 60 °C + 2 horas a 25 °C	77,7	25824	1154	85,9
5	6,8		72,4	25728	1151	81
6	6,9		76,4	26177	1171	86
Promedios	6,8	-	75,5	25910	1158	84,3
Desv. Est.	0,1	-	2,8	236	11	2,9



- Flow Number

Tabla A10.14. Resultados para Flow Number– Tramo 1% PEAD

Resultados de la deformación permanente por Flow Number							
Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Esfuerzo desviador promedio (kPa)	Esfuerzo contacto promedio (kPa)	Error estándar máximo de la carga (%)	Flow Number (Ciclos)	Deformación permanente @ FN (1×10^{-6} mm/mm)
4	6,5	58	598,9	30	1,71	1673	17,156
5	6,7	57,98	598,5	30	1,52	1691	13,623
6	6,6	57,98	598,8	30	1,69	1395	18,007
Promedio	6,61	57,99	598,7	30	1,6	1586	16,262
Desvest	0,09	0,01	0,2	0	0,1	166	2,325

- APA

Tabla A10.15. Resultados del Asphalt Pavement Analyzer (APA) – Tramo 1% PEAD

Resultados del porcentaje de vacíos y deformación permanente en el equipo APA				
Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Deformación (mm)
1	7,3	60,2	LI	1,331
2	7,3			
3	7,5		LC	1,86
4	7			
5	7,4		LD	1,892
6	7,2			
Promedio	7,3			1,694
Desv. Est.	0,2			0,315

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 362 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



- Rueda de Hamburgo

Tabla A10.16. Resultados para Rueda de Hamburgo – Tramo 1% PEAD

Resultados del ensayo de deformación permanente en la Rueda de Hamburgo					
Nº Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Grupo	Impresión a las 20 000 pasadas	Cantidad de ciclos del punto de inflexión PSI
1	7	49,9	LI	-3,115	NA
2	7,2		LD	-3,796	NA
3	7,1				
4	7,3				
Promedio	7,1			-3,455	
Desvest	0,1			0,481	

- Fatiga

Tabla A10.17. Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción 400µs– Tramo 1% PEAD

Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción para el ensayo a deformación controlada a 400 microstrain						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1x10 ⁻⁶ mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V1	7,2	19,8	401	6652	3307	51910
B1-V4	7,2	19,8	401	6378	3169	160088
B2-V1	7	19,7	399	7106	3551	97664
B2-V4	7,1	19,7	400	7076	3533	122178
Promedio	7,1	19,8	400	6803	3390	107960
Desv. Est.	0,1	0,1	1	351	184	45,340

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 363 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------



Tabla A10.18. Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción 600 μ s– Tramo 1% PEAD

Resultados de fatiga mediante carga a flexotracción para el ensayo a deformación controlada a 600 microstrain						
No. Espécimen	Porcentaje de vacíos (%)	Temperatura (°C)	Deformación unitaria a tensión (1x10 ⁻⁶ mm/mm)	Rigidez inicial a flexión (MPa)	Rigidez final a flexión (MPa)	Número de ciclos de fatiga
B1-V2	6,7	19,9	600	6294	3147	17931
B1-V3	7,3	19,8	600	5786	2886	20365
B2-V2	6,8	20	600	6642	3319	28726
B2-V3	7,2	20	600	6690	3335	18396
Promedio	7	19,9	600	6353	3172	21355
Desv. Est.	0,3	0,1	0	417	209	5026



Análisis estadístico Fatiga-400 μ s

ANOVA unidireccional: Ciclos 400 vs. Mezcla

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Mezcla	3	Control, PEAD, PET

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Mezcla	2	3933588640	1966794320	1.37	0.303
Error	9	12958306451	1439811828		
Total	11	16891895090			



Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
37944.9	23.29%	6.24%	0.00%

Medias

Mezcla	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Control	4	145153	32521	(102234, 188071)
PEAD	4	107960	45340	(65041, 150879)
PET	4	105637	34729	(62718, 148556)

Desv.Est. agrupada = 37944.9

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Mezcla	N	Media	Agrupación
Control	4	145153	A
PEAD	4	107960	A
PET	4	105637	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 366 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.



Análisis estadístico Fatiga-600 μ s

ANOVA unidireccional: Ciclos 600 vs. Mezcla

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna Por lo menos una media es diferente
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Mezcla	3	Control, PEAD, PET

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Mezcla	2	111065215	55532608	2.42	0.144
Error	9	206453355	22939262		
Total	11	317518570			



Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4789.49	34.98%	20.53%	0.00%

Medias

Mezcla	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Control	4	14764	5619	(9347, 20182)
PEAD	4	21355	5026	(15937, 26772)
PET	4	15047	3462	(9629, 20464)

Desv.Est. agrupada = 4789.49

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Mezcla	N	Media	Agrupación
PEAD	4	21355	A
PET	4	15047	A
Control	4	14764	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Diciembre 2023	Página 368 de 368
-----------------------------------	----------------	-------------------

Tel.: +506 2511-2500 | Fax: +506 2511-4440 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr

Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.

Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.